

УДК 539.536.2:546.281.26

СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Г. В. СТЕПАНОВ, д-р техн. наук, **В. И. ЗУБОВ**, канд. техн. наук
(Ин-т проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, г. Киев, Украина),
А. Л. МАЙСТРЕНКО, чл.-кор. НАН Украины, **В. Г. КУЛИЧ**, инж.,
С. И. ШЕСТАКОВ, канд. техн. наук, **Л. И. АЛЕКСАНДРОВА**, инж.
(Ин-т сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина),
В. Е. ДАНИЛЮК, канд. воен. наук (Нац. акад. обороны Украины, г. Киев)

Описаны методики и результаты испытаний керамических материалов на основе самосвязанного карбида кремния при статических и динамических условиях нагружения. Приведены результаты экспериментальной оценки влияния скорости ударного нагружения (до 270 м/с) на прочность при круговом изгибе керамических элементов ударостойких преград.

Описано методики і результати випробувань керамічних матеріалів на основі самозв'язаного карбиду кремнію при статичних і динамічних умовах навантаження. Наведено результати експериментальної оцінки впливу швидкості ударного навантаження (до 270 м/с) на міцність при круговому вигині керамічних елементів ударостійких перешкод.

Methodologies and results of tests of ceramic materials on basis of self-bound silicon carbide under static and dynamic conditions of loading are described. Results of experimental estimation of influence of the impact load rate (up to 270 m/s) on strength at circular bend of ceramic elements of the shock-resistant obstacles are presented.

Накопленный многолетний опыт производства и эксплуатации ударостойких преград с керамическими элементами показывает эффективность их использования при условии, что кинетическая энергия пули превышает 2,0...2,5 кДж. Фирмы-производители для изготовления бронеэлементов высших классов баллистической защиты наиболее часто используют керамические материалы на основе карбида бора и кремния, а также оксида алюминия или материалов на их основе [1–3]. Керамические ударостойкие элементы для отечественных бронежилетов 3–5-го классов защиты, например типа ББ5-15 [4] и «Корсар-5» [5], производятся из бронекерамики на основе карбида бора. В последнее десятилетие зарубежные производители бронежилетов наивысших классов защиты, кроме карбида бора, широко используют керамические материалы на основе оксида алюминия типа CAP3 [6] и карбида кремния CIB-15...CIB-19; SC-DS...SC-RB [6, 7]. В работах [3, 8] показано, что керами-

ческие материалы на основе самосвязанного карбида кремния имеют достаточно высокие механические и баллистические характеристики, которые не уступают перечисленным выше применяемым материалам, но, что немаловажно, существенно технологичнее и дешевле их. Поскольку керамические элементы в конструкциях рассматриваемого типа подвергаются динамическому нагружению [9], для расчетной оценки эффективности использования различных материалов в ударостойких преградах необходимы модель деформирования применяемых материалов и их физико-механические свойства.

В работе [8] исследовано влияние способа и условий спекания, фракционного состава шихты и реологических свойств используемого временного связующего на изменение структуры, свойств керамических материалов на основе самосвязанного карбида кремния, определены соответствующие им значения плотности, твердости и модуля упругости.

© Г. В. СТЕПАНОВ, В. И. ЗУБОВ, А. Л. МАЙСТРЕНКО, В. Г. КУЛИЧ, С. И. ШЕСТАКОВ, Л. И. АЛЕКСАНДРОВА, В. Е. ДАНИЛЮК, 2009

Однако для построения модели деформирования и разрушения многослойных керамико-композиционных ударостойких преград необходимы данные о деформационных и прочностных характеристиках материалов при динамическом нагружении, которые могут существенно отличаться от этих характеристик при статическом деформировании. В данной статье приведены результаты экспериментальной оценки физико-механических характеристик материалов на основе карбида кремния, их статической и динамической прочности.

Методики и результаты испытаний. Практически все приведенные в данной работе характеристики физико-механических свойств исследуемых материалов определены с использованием ординарных стандартных экспериментальных методов механических испытаний материалов.

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания, модуль упругости материала — резонансным методом в диапазоне частот от 90 до 190 кГц на ультразвуковой установке «Звук-107» (разработка НИИАШ, С.-Петербург, РФ), оснащенной автоматизированной системой компьютерной регистрации и обработки спектра колебаний образца, созданной в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины [10].

Коэффициент температурного расширения определяли на термомеханическом анализаторе ТМА1090 (фирма «Дю Понт», США) в диапазоне температур от 20 до 1000 °С по методике из работы [11], а трещиностойкость исследуемых материалов — на цилиндрических образцах с шевронным надрезом на уста-

новке «Фрактометр» (фирма «Терра Тек», США).

Прочность керамических материалов при трех- и четырехточечном изгибе в условиях статического нагружения вычисляли по стандартным методикам. Определение предела прочности при трех- и четырехточечном изгибе в условиях статического нагружения проводили в специальном прецизионном нагружающем устройстве, исключающем перекося образца и минимизирующем трение между образцом и опорами и в нагружающих колоннах. Нагружение производили на испытательной машине FP-10 (при номинальной скорости деформирования 0,1 мм/мин = $1,66 \cdot 10^{-6}$ м/с).

Испытания проводили на образцах-свидетелях, т. е. образцах, прошедших все этапы технологического процесса спекания керамики совместно с изделиями, размерами 5×5×35 и 5×10×50 мм, а также на образцах, вырезанных непосредственно из изделий (табл. 1).

Испытания керамических пластин на круговой изгиб проводили на испытательной машине ИР 5047-50 (при скорости деформирования 0,12 мм/мин = $2 \cdot 10^{-6}$ м/с) с графической записью диаграмм нагрузка — время $P(t)$ и деформация — время $\epsilon(t)$. При этом контролируемая погрешность измерений не превышала 10 % при доверительной вероятности $p = 0,95$.

Ввиду того, что исследуемые керамические материалы предназначены для применения в элементах конструкций, нагружаемых динамическими нагрузками, определению проч-

Т а б л и ц а 1. Физико-механические свойства конструкционной керамики на основе карбидов бора и кремния, полученных различными технологическими способами [8]

Материал, способ его спекания*	Плотность ρ , г/см ³	Твердость по Виккерсу HV , ГПа (при 5 Н)	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент Пуассона ν	Коэффициент температурного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (20... 1000 °С)	Предел прочности при изгибе $\sigma_{\text{из}}$, МПа**	Трещиностойкость K_{IC} , МПа·м ^{1/2}
B ₄ C, ГП	2,48... 2,52	22... 25	420... 430	0,19	5,2... 5,8	210... 230	3,5... 3,9
SiC, ГП	3,20	25	425	0,18	4,6	270	4,4
SiC-Si, РС	3,03	18	392	0,17	4,3	295	4,5
SiC-Si, РС	3,12	20	413	0,18	4,5	370	4,6

* Здесь и в табл. 2 ГП — горячее прессование; РС — реакционное спекание. ** — испытания проведены по схеме четырехточечного изгиба.

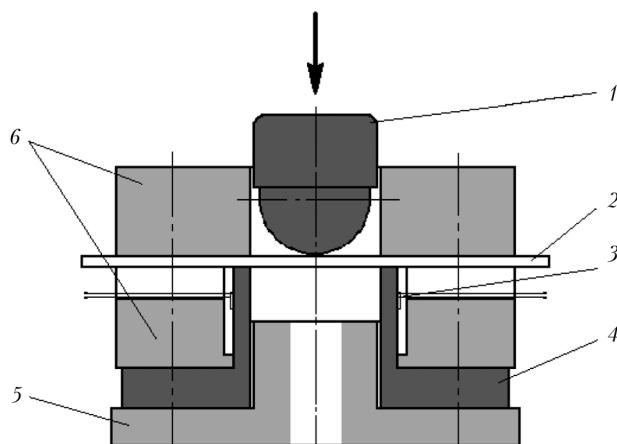


Рис. 1. Схема нагружения керамической пластины при испытаниях на круговой изгиб при статическом и ударном нагружении: 1 – пуансон; 2 – образец; 3 – тензорезистор; 4 – цилиндрический динамометр; 5 – опорная плита; 6 – плиты узла фиксации образца

ности при ударном нагружении в работе уделено особое внимание.

Динамические испытания выполняли по методикам и на установках, разработанных в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Испытания проводили по методике, основанной на круговом изгибе защемленной по контуру тонкой керамической пластины, нагружаемой бойком (ударником) со сферической головной частью (рис. 1, 2) [12, 13].

Схемы статического и ударного деформирования пластин, за исключением способов регистрации параметров нагружения и деформирования образцов, практически полностью идентичны. Образец 2 (рис. 1, 2) фиксируется между плоскими поверхностями верх-

ней и нижней плиты 6 и нагружается перемещением пуансона 1 со сферической головной частью. Нагрузку на пластину создавали ударом бойка-ударника по пуансону через демпфирующий элемент. Нагрузка на пластину при ударном нагружении может быть рассчитана по упругой деформации динамометра (цилиндрической части опоры 4), регистрируемой тензорезисторами 3, которые наклеены на его наружной цилиндрической поверхности. Тензорезисторы, наклеенные на тыльную поверхность пластин (рис. 3), позволяют регистрировать деформацию в центре пластины. Диаграммы деформация – время $\epsilon(t)$ при ударном нагружении записывали в блок памяти цифрового осциллографа, обработку диаграмм осуществляли с помощью пакета прикладных программ EXCEL 97 [14].

Ввиду того, что диапазон исследуемых скоростей деформирования керамических материалов, применяемых в ударостойких преградах, настолько широк (до 700... 800 м/с), что его невозможно реализовать на одной испытательной установке, для ударных испытаний использовали две экспериментальные установки. Испытания при ударном нагружении со скоростями до $v = 60$ м/с проводили на пневматическом вертикальном копре, а при более высоких скоростях – на пневмопороховом копре [14].

Для снижения эффектов трения между поверхностями пуансона и пластины, а также гашения энергии возможного отскока при ударном нагружении между ними помещали

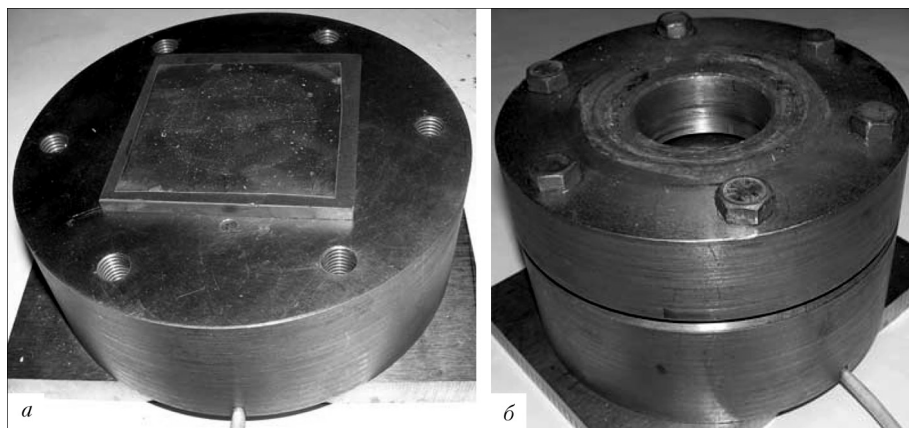


Рис. 2. Общий вид керамической пластины, установленной на опорную плиту узла для ударного нагружения образца по схеме кругового изгиба (а) и общий вид узла в сборе (б)

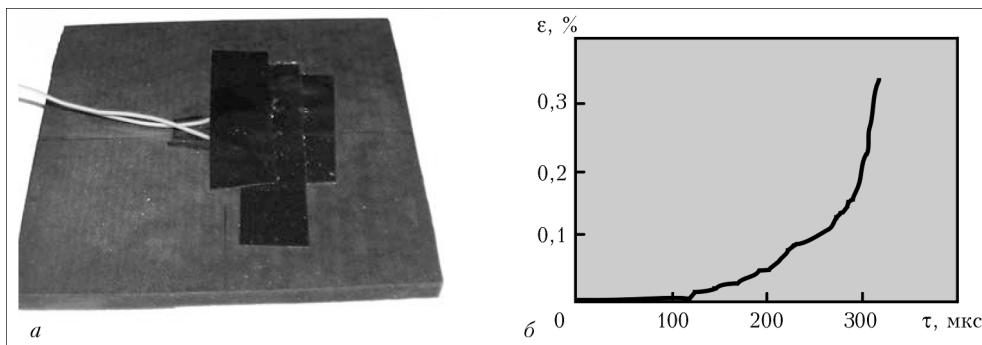


Рис. 3. Керамическая пластина с наклеенными тензорезисторами, подготовленная для ударного нагружения (а), и осциллограмма деформации на тыльной поверхности пластины (б) из SiC-Si, скорость ударного нагружения $v = 245$ м/с

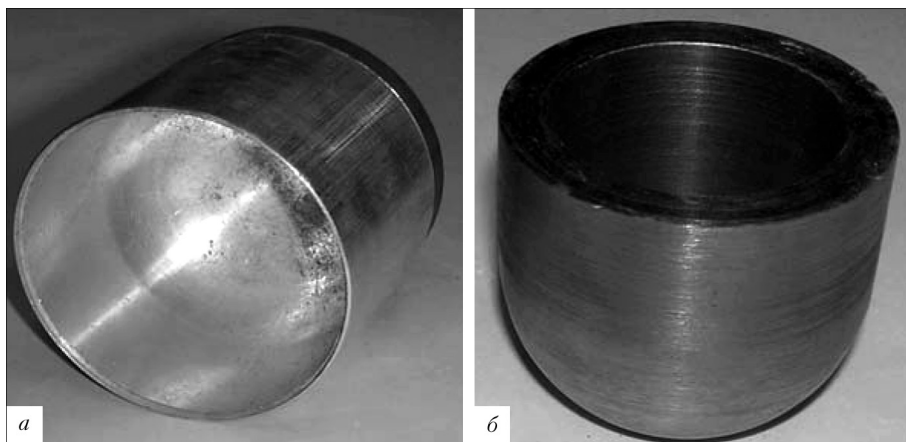


Рис. 4. Ударник для нагружения керамических пластин (а) при кольцевом изгибе (алюминиевый поддон с плоским стальным диском) и стальной пуансон со сферической головной частью (б)

демпфирующую прокладку из меди толщиной до 2,0 мм. При испытаниях удар по пуансону наносили бойком со стальным диском, который разгонялся по каналу ствола диаметром до требуемой скорости давлением сжатого газа. Использовали бойки, изготовленные из алюминиевого сплава со стальной накладкой, и пуансоны из термообработанной стали (рис. 4).

Анализ результатов испытаний при круговом изгибе. При статическом и ударном нагружении пластин имеет место хрупкое разрушение без явных признаков пластических деформаций, что следует из внешнего вида фрагментов разрушенных образцов (рис. 5, 6). Фрагментация керамических пластин без признаков макропластической деформации наблюдалась и при натурных баллистических испытаниях при скорости ударного нагружения 730 м/с. Поэтому значения разрушающих напряжений при круговом изгибе (табл. 2, рис. 7) рассчитывали по предельным

значениям деформаций на поверхности образцов, предполагая, что в пределах исследуемых скоростей деформирования модуль упругости испытанных материалов не отличается от статического.

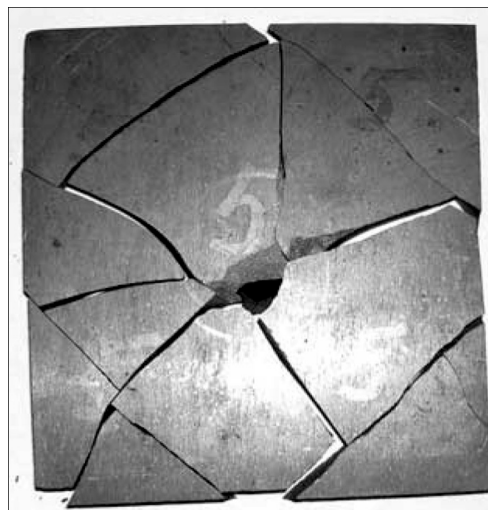


Рис. 5. Характерный вид разрушения керамической пластины при статическом деформировании ($2 \cdot 10^{-6}$ м/с)

Таблица 2. Результаты испытаний при круговом изгибе в процессе статического и ударного нагружения керамических пластин

Материал и способ спекания	Плотность ρ , г/см ³	Скорость деформирования v , м/с	Модуль упругости E , ГПа	Максимальная деформация разрушений, $\epsilon_{\max} \cdot 10^2$, %	Расчетная прочность при круговом изгибе $\sigma_{изг}$, МПа
SiC-Si, PC	3,06	$2 \cdot 10^{-6}$	395,2	7,97	315
SiC-Si, PC	3,04	$2 \cdot 10^{-6}$	373,5	6,97	260
SiC-Si, PC	3,01	$2 \cdot 10^{-6}$	352,3	7,23	234
SiC, ГП	3,20	50	428,5	5,07	217
SiC+B ₄ C(«усы») – Si, PC	3,03	56,7	369,3	10,29	380
SiC-Si, PC	2,96	101	339,6	18,16	618
B ₄ C, ГП	2,51	107	425,3	13,7	580
SiC, ГП	3,19	118	425,3	13,3	566
SiC-Si, PC	3,08	177	403,2	17,5	706
SiC, ГП	3,19	185	426,0	12,3	524
SiC-Si, PC	3,08	245	403,1	14,1	568
SiC-Si, PC	2,95	271	328,6	1,69	554

Из табл. 1, в которой приведены физико-механические свойства карбидокремниевых материалов, спеченных различными технологическими способами, следует, что самую высокую плотность имеет горячепрессованный карбид кремния ($3,20 \text{ г/см}^3$ при теоретически возможной $3,21 \text{ г/см}^3$). Это вполне естественно, так как консолидация структуры карбида кремния происходит при повышенном давлении и температуре $2100 \text{ }^\circ\text{C}$, в результате чего имеет место не только пластическая деформация зерен, но и их сращивание в единый, практически беспористый, каркас. Кроме того, отсутствует менее плотная, чем карбид кремния, связка. Плотность реакционно спеченного карбида кремния дос-

тигает несколько меньшего уровня $3,03 \dots 3,12 \text{ г/см}^3$, причиной чего является присутствие в структуре остаточного несвязанного кремния. К тому же, следует обратить внимание (табл. 1, 2), что несмотря на различие в способах спекания SiC и видов испытаний значения прочности, полученные при статическом изгибе (чистом и круговом), достаточно близки.

Из анализа результатов испытаний при круговом изгибе следует, что прочность на изгиб горячепрессованных карбидов бора и кремния, самосвязанного карбида кремния, с увеличением скорости ударного нагружения с $2 \cdot 10^{-6}$ до 270 м/с возрастает примерно в 2 раза (рис. 7).

Рис. 6. Характерный вид разрушения при круговом изгибе образцов, нагруженных ударом сферическим ударником: а – $v = 57$; б – 101 ; в – 245 м/с

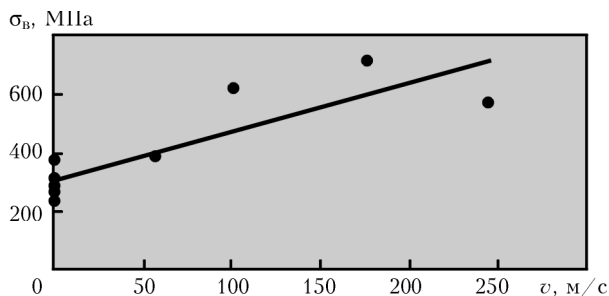


Рис. 7. Зависимость прочности карбида кремния σ_v при круговом изгибе от скорости ударного нагружения

Прочность образцов, определенная в условиях чистого и кругового изгиба, на основании принятой в практике испытаний на прочность керамических материалов и твердых сплавов методики, приближенно считают равной удвоенному значению прочности на растяжение [15]. Значения прочности, определенные при круговом изгибе и пересчитанные в значения прочности при растяжении позволяют сделать вывод о том, что повышение скорости ударного нагружения с $2 \cdot 10^{-6}$ до 270 м/с приводит к увеличению прочности на растяжение примерно в 2 раза. 🐼

1. *The armour ceramics ballistic efficiency evaluation* / V. S. Neshpor, G. P. Zaitsev, A. L. Maystrenko et al. // Abstracts of eighth cimetc world ceramics congress forum «New Materials», 1994, Florencia, Italy. — P. 102.
2. *Peculiarities of manufacturing and properties of high-density silicon carbide-based armored ceramics* / O. A. Rozenberg, A. L. Maystrenko, V. G. Kulich, S. I. Shestakov // Proc. 5th Intern. armament conf., Waplevo, Poland, 2004. - 11 p.
3. *Вишняков Л. Р., Мазна О. В., Нешпор А. В. и др.* Вплив конструктивно-технологічних факторів на

властивості високоенергостійких бронееlementів на основі кераміки // Пробл. прочности. — 2004. — № 6. — С. 128–135.

4. *Средства индивидуальной бронезащиты, костюмы и форма специального назначения.* — Ирпень: Ирпенский комбинат «Перемога», 1997. — 11 с.
5. *Бронезащита ...* — Ирпень: НПП ТЕМП-3000, 2006. — 21 с.
6. *Ceramic armor — ceramic materials for vehicular and personal armor applications from coors tek* // AZoM™ — The A to Z of materials and AZoJomo — The «AZo J. of Materials Online»... AZoM™.com Pty. Ltd.
7. *CRAIG International ballistics — silicon carbide (SiC) S.A.P.I* // CRAIG International Ballistics 2000–2005, Internet.
8. *К вопросу о возможностях получения высокоплотных керамических изделий на основе самосвязанного карбида кремния* / В. Г. Кулич, В. И. Куш, В. Н. Ткач, А. Л. Майстренко // Сверхтвердые материалы, 2009.
9. *Особенности деформирования и разрушения пластин из хрупких материалов при ударном нагружении* / В. В. Харченко, А. Л. Майстренко, А. И. Бабуцкий, Е. А. Кондряков // Пробл. прочности. — 2000. — № 3. — С. 86–91.
10. *Глаговский Б. Д., Москоенко И. Б.* Низкочастотные акустические методы в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1977. — 332 с.
11. *Barker L. M.* // Fract. Mech. of Ceramics. — 1978. — Vol. 3. — P. 483.
12. *Болтон У.* Конструкционные материалы, металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. Карманный справочник / Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. — 320 с.
13. *Степанов Г. В., Зубов В. И., Олисов А. Н., Токарев В. М.* Прочность тонколистовых металлов при ударном растяжении // Пробл. прочности. — 2000. — № 4. — С. 62–69.
14. *Степанов Г. В., Зубов В. И.* Энергоемкость деформирования до разрушения заземленной по круговому контуру тонкой пластины при ударном нагружении // Там же. — 2001. — № 2. — С. 88–91.
15. *Степанов Г. В.* Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. — Киев: Наук. думка, 1991. — 287 с.