

Влияние скорости нагружения на прочность керамических материалов на основе самосвязанного карбида кремния

Г. В. Степанов^а, В. И. Зубов^а, А. Л. Майстренко^б, В. Г. Кулич^б,
С. И. Шестаков^б, Л. И. Александрова^б, В. И. Куш^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Институт сверхтвёрдых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина

Описаны методики испытаний керамических материалов на основе самосвязанного карбида кремния при статическом и динамическом (ударном) нагружении. Приведены результаты исследований влияния скорости нагружения на изменение прочности керамических материалов, применяемых в качестве элементов ударостойких преград.

Ключевые слова: карбид кремния, керамическая пластина, скорость нагружения, ударное нагружение, разрушение, прочность.

Введение. Многолетний опыт производства и эксплуатации ударостойких преград, накопленный до настоящего времени, показывает, что если кинетическая энергия, передаваемая метаемому телу современным огнестрельным оружием, превышает величину 2,0...2,5 кДж, то для изготовления бронеэлементов высших классов баллистической защиты чаще всего используются керамические материалы на основе карбида бора и кремния, а также оксида алюминия [1–3]. В частности, керамические ударостойкие элементы для отечественных бронежилетов 3–5-го классов защиты, например типа 6Б5-15 [4] и “Корсар-5” [5], изготавливаются из бронекерамики на основе карбида бора. Зарубежные производители бронежилетов наивысших классов баллистической защиты в последнее десятилетие кроме карбида бора [6] широко используют керамические материалы на основе оксида алюминия типа САРЗ [6] и карбида кремния С1В-15...С1В-19; SC-DS...SC-RB [6, 7]. В работах [3, 8] было показано, что керамические материалы на основе самосвязанного карбида кремния имеют достаточно высокие механические и баллистические характеристики, которые не уступают таковым вышеуказанных материалов. Однако, что немаловажно, они существенно технологичнее и дешевле. Поскольку материалы в конструкциях рассматриваемого типа находятся в экстремальных условиях локального динамического нагружения [9], для количественной оценки надежности ударостойкой преграды необходимо разработать модель деформирования применяемых материалов и знать их физико-механические свойства. В работе [8] проводилось исследование влияния способа и условий спекания, фракционного состава шихты и реологических свойств временного связующего на изменение структуры и свойств керамических материалов на основе самосвязанного карбида кремния. Там же были определены соответствующие им величины плотности, твердости и модуля упругости. Однако для построения модели деформирования и разрушения многослойных керамико-композиционных ударостойких преград этих данных

недостаточно, так как необходимо располагать сведениями о деформационных и прочностных характеристиках материала изделия именно при динамическом нагружении. Кроме того, что динамическая прочность материалов существенно отличается от прочности, полученной при статическом деформировании, ее определение обусловлено большими методическими трудностями.

Настоящее исследование посвящено определению влияния скорости нагружения на изменение прочности керамических материалов на основе карбида кремния.

Методики испытаний. Практически все приведенные ниже характеристики физико-механических свойств исследуемых материалов определены с использованием обычных стандартных экспериментальных методов механических испытаний материалов. Так, плотность образцов определялась методом гидростатического взвешивания, модуль упругости материала – резонансным методом в диапазоне частот 90...190 кГц на ультразвуковой установке “Звук-107” [10], разработанной в ВНИИАШ (Санкт-Петербург, Российская Федерация), которая оснащена автоматизированной системой компьютерной регистрации и обработки спектра колебаний образцов, созданной в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины. Коэффициент температурного расширения определялся на термомеханическом анализаторе ТМА 1090 (фирма DuPont, США) в диапазоне температур 20...1000°C, трещиностойкость – на цилиндрических образцах с шевронным надрезом на установке Фрактометр (фирма TerraTec, США) по методике, описанной в работе [11].

Прочность керамических материалов при трех- и четырехточечном изгибе в условиях статического нагружения определялась на призматических образцах (рис. 1) по стандартным методикам в специальном прецизионном нагружающем устройстве [12]. Данное устройство позволяет исключить перекос образца и обеспечивает минимальное трение между образцом и нагружающими опорами. Нагружение осуществлялось на испытательной машине FR-10 при скорости 0,1 мм/мин ($1,66 \cdot 10^{-6}$ м/с). Испытания на круговой изгиб керамических пластин (рис. 2) проводились на испытательной машине ИР 5047-50 при скорости нагружения 0,12 мм/мин ($2,0 \cdot 10^{-6}$ м/с) с графической записью диаграмм нагрузка P – деформация ε во времени t . При этом контролируемая погрешность измерений составляет 10% при доверительной вероятности $p = 0,95$. Испытания проводились на образцах-свидетелях размером $5 \times 5 \times 35$ и $5 \times 10 \times 50$ мм, т.е. образцах, прошедших все этапы технологического процесса совместно с изделиями, а также образцах, вырезанных непосредственно из изделий (рис. 1). Результаты указанных видов испытаний представлены в табл. 1, где ρ – плотность; HV – твердость по Виккерсу (при нагрузке 5 Н); E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; α – коэффициент температурного расширения (20...1000°C); σ_p – предел прочности при растяжении, пересчитанный по результатам испытаний на четырехточечный изгиб; K_{Ic} – трещиностойкость при испытаниях на трехточечный изгиб.

Видно, что самую высокую плотность имеет горячепрессованный карбид кремния, что вполне естественно, так как в его структуре отсутствует менее

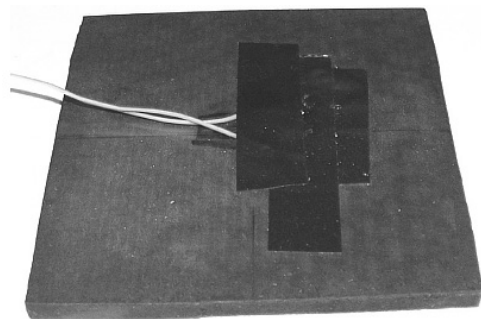
плотная, чем карбид кремния, связка. Малое содержание несвязанного кремния приводит к тому, что плотность реакционно-спекенного карбида кремния достигает $2,95...3,12 \text{ г/см}^3$, а твердость, модуль упругости и прочность имеют достаточно высокие для этого класса материалов значения. Следует, однако, отметить, что несмотря на разные методы спекания SiC и виды испытаний, полученные значения прочности при статическом изгибе (чистом и круговом) достаточно близки.

Т а б л и ц а 1

Физико-механические свойства конструкционной керамики на основе карбидов бора и кремния, спекенных различными технологическими способами [8]

Материал и способ его спекания	ρ , г/см ³	HV, ГПа	E, ГПа	ν	$\alpha \cdot 10^{-6}$, °C ⁻¹	σ_p , МПа*	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

Примечания. Здесь и в табл. 2: ГП – горячее прессование, РС – реакционное спекание; звездочкой отмечены данные испытаний по схеме четырехточечного изгиба.



◀ Рис. 1. Керамические образцы для статических испытаний при трех- и четырехточечном изгибе.

Рис. 2. Общий вид образца керамической пластины с наклеенными тензодатчиками для испытаний.

Поскольку исследуемые керамические материалы предназначены для применения в элементах конструкций, нагружаемых динамическими нагрузками, определению прочности при высокоскоростном нагружении уделяется особое внимание. Динамические испытания выполнялись по методикам и на установках, которые были разработаны в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Испытания керамических пластин при статическом и ударном нагружении проводились по методике, основанной на деформировании (по схеме кругового изгиба) заземленной по контуру тон-

кой керамической пластины. В качестве нагружающего элемента использовался цилиндрический боек со сферической головной частью [13, 14] (рис. 3, 4). Схемы статического и ударного нагружения пластин, за исключением способов регистрации параметров деформирования испытуемых образцов, были практически идентичными. Образец (рис. 3) фиксировался между плоскими поверхностями верхнего и нижнего фланцев и нагружался перемещением промежуточного цилиндрического бойка со сферической головной частью. Нагрузка на пластину создавалась ударом по промежуточному стержню через демпфирующий элемент и определялась по упругой деформации динамометра (цилиндрической части опоры). Деформация динамометра регистрировалась проволочными тензодатчиками, наклеенными на его наружной цилиндрической поверхности. Для снижения влияния трения между поверхностями бойка и образца, а также гашения энергии возможного отскока при испытании на копрах на поверхность испытуемого образца (рис. 4) накладывалась демпфирующая прокладка из меди толщиной до 2,0 мм. Деформация пластин измерялась параллельно одноразовыми тензодатчиками, наклеенными непосредственно на поверхность пластин (рис. 2). Диаграммы изменения нагрузки и деформации образцов во времени при ударном нагружении записывались в блок памяти цифрового осциллографа и обрабатывались с использованием пакета прикладных программ EXCEL 2000 аналогично [14].

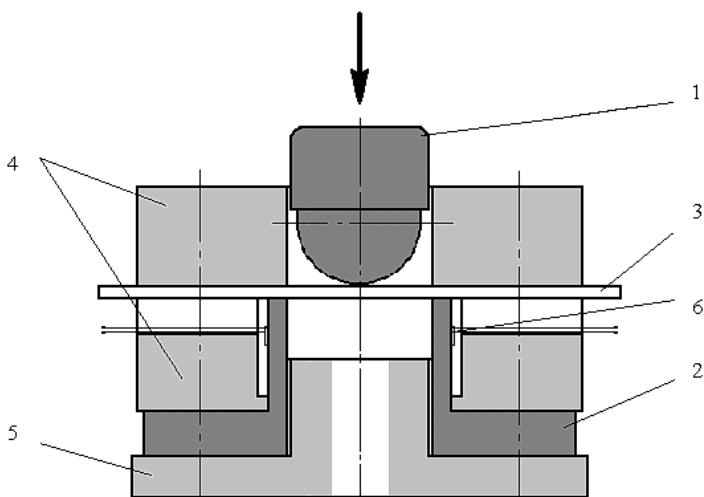


Рис. 3. Схема нагружения керамической пластины при испытаниях на круговой изгиб при статическом и ударном нагружении: 1 – боек; 2 – цилиндрический динамометр; 3 – образец; 4 – плиты узла фиксации образца; 5 – опорная плита; 6 – выводы тензорезисторов.

Поскольку диапазон исследуемых скоростей нагружения керамических материалов, применяемых в ударостойких преградах, очень широк (до 700...850 м/с), его невозможно реализовать на одной испытательной установке. Поэтому испытания проводились на двух разных установках [15]. Из условия неупругого соударения нагружающей массы M со скоростью метания V_0 с промежуточным стержнем массой m скорость нагружения будет

$$V = V_0 M / (m + M).$$

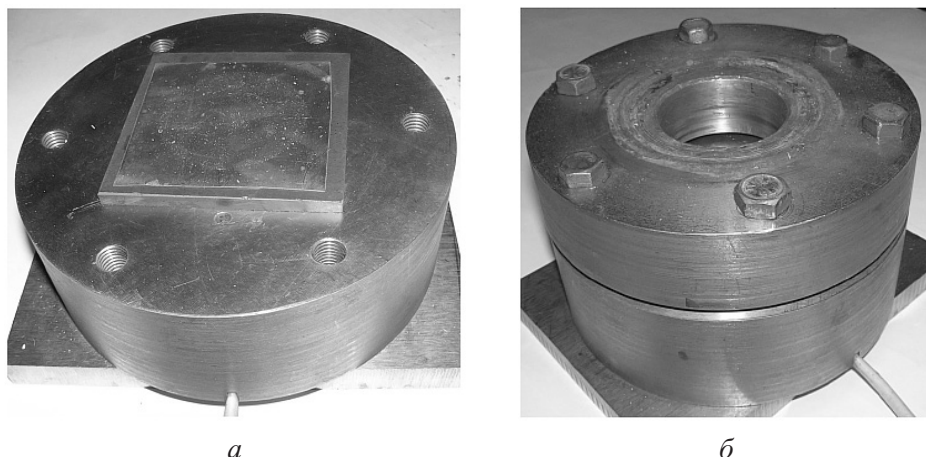


Рис. 4. Общий вид керамической пластины, установленной на опорную плиту узла, для ударного нагружения образца по схеме кругового изгиба (а) и общий вид узла в сборке (б).

Так, испытания при ударном нагружении со скоростями до $V = 60$ м/с проводились на вертикальном копре, со скоростями до $V = 120$ м/с и выше 200 м/с – на пневматическом копре [15]. При испытаниях со скоростью нагружения до $V = 100$ м/с на пневматическом копре удар по бойку наносился промежуточным стержнем, который разгонялся до требуемой скорости давлением сжатого газа в канале ствола диаметром 64 мм. Метательные бойки для ударных испытаний керамических пластин изготавливались из алюминиевого сплава со стальной накладкой из термообработанной стали.

Схема регистрации диаграмм упругая деформация сжатия динамометра ε_d – время нагружения t и упругая деформация растяжения образца ε_n – время t идентична использованной при статическом и динамическом нагружении (рис. 5). При выбранных размерах динамометра из закаленной стали (высота цилиндрической части $l_d = 12,5$ мм) в нем обеспечивается близкое к однородному напряженно-деформированное состояние при длительности увеличения нагрузки $t_d \gg 2l_d/c_0 \approx 5$ мкс (c_0 – скорость распространения упругой продольной волны в динамометре), что выполнялось в проведенных испытаниях. Возникающие при ударном нагружении в процессе кругового изгиба волновые процессы в квадратной пластине размером $100 \times 100 \times 10$ мм в деформируемой ее части диаметром $d = 40$ мм вызывают нестационарное напряженно-деформированное состояние. Отклонением этого состояния от квазистатического можно пренебречь при длительности увеличения нагрузки в испытуемом образце $t_t \gg d/c_t \approx 20$ мкс (c_t – радиальная скорость распространения волны деформаций сдвига).

Отметим, что зависимости, полученные в тарировочных экспериментах при статическом прогибе испытуемых пластин из металла и керамики, не совпадают. Это может быть обусловлено различной изгибной жесткостью пластин, влияющей на напряженное состояние вблизи их поверхности контакта с динамометром. Расчет усилия на пластину при ударном нагружении выполнялся с использованием тарировочных зависимостей, полученных при статическом нагружении каждого из испытуемых материалов.

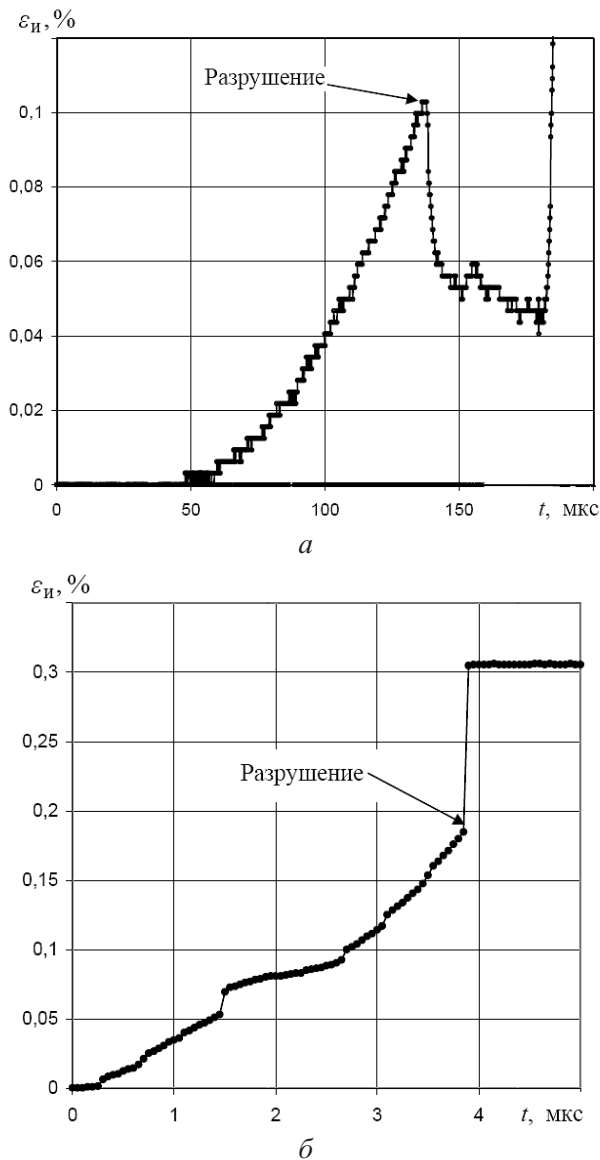


Рис. 5. Примеры экспериментально зарегистрированных осциллограмм $\varepsilon_{II} - t$ для образцов SiC-Si: № 1 при скорости ударного нагружения $V = 57$ м/с (а) и № 6 при $V = 177$ м/с (б).

Поскольку при скоростях нагружения выше 50 м/с наблюдались собственные колебания динамометра, которые накладывались на процесс деформирования образца, показания регистрирующих устройств могут быть не совсем корректными. Процессы нагружения и разрушения образца анализировались на основании записи диаграммы деформирования самого образца $\varepsilon_{II} - t$.

Результаты испытаний и их анализ. Диаграммы деформирования керамических образцов в исследуемом диапазоне скоростей нагружения близки к линейным (рис. 5), т.е. имеет место хрупкое разрушение без явных признаков пластических деформаций, что подтверждает анализ внешнего вида фрагмен-

тов разрушенных образцов (рис. 6 и 7). Такая же фрагментация керамических пластин без признаков макропластической деформации отмечалась и при их натуральных баллистических испытаниях со скоростями нагружения 730 м/с. Для сравнения прочностных характеристик испытанных керамических материалов с таковыми металлических материалов приведены полученные ранее [15] данные о влиянии скорости нагружения на изменение прочности стали 45.

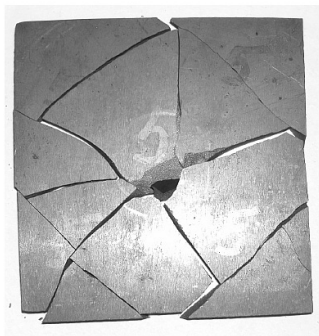


Рис. 6. Характерный вид разрушения керамической пластины при статической скорости нагружения $V = 2 \cdot 10^{-6}$ м/с.

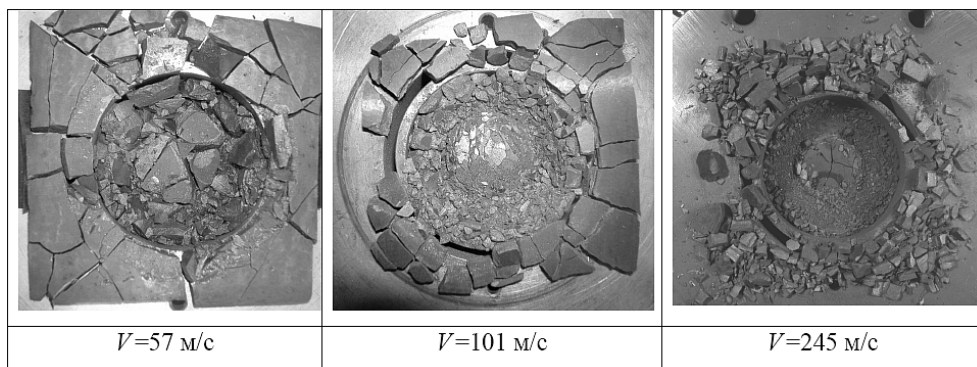


Рис. 7. Характерный вид образцов, разрушенных в результате кругового изгиба, при динамическом нагружении ударником со сферической головной частью.

Несмотря на то что испытания образцов из карбида кремния и стали 45 проводились в условиях чистого и кругового изгиба, прочность при растяжении этих материалов приближенно считают равной половине прочности при изгибе на основании допущения [16], принятого в практике испытаний керамических материалов и твердых сплавов. С использованием этого допущения характеристики прочности, полученные при изгибе, пересчитаны в значения прочности при растяжении (рис. 8,а). Из приведенных на рис. 8,а графиков следует, что значения прочности карбидо-кремниевых материалов, так же как и стали 45, в указанном выше диапазоне скоростей нагружения изменяются линейно, увеличиваясь практически в два раза по сравнению с их прочностью при статическом деформировании.

При условии обеспечения в образце в процессе динамического нагружения однородного деформационного состояния постоянная скорость деформации определяет постоянную скорость условной относительной деформации

его рабочей части. Таким образом, непосредственно из диаграмм $\varepsilon_{II} - t$ можно определить характерную зависимость кинетики прочности разрушения испытуемого материала, соответствующую заданному в ходе эксперимента значению относительной скорости деформации. При этом постоянство скорости деформации определяется жесткостью цепи нагружения и регистрации деформации. Выбранные значения в табл. 2 и представленная степенная зависимость $\sigma_{II} - t$ (рис. 8,б) соответствуют равномассовым величинам нагружающей массы M и промежуточного стержня массой m .

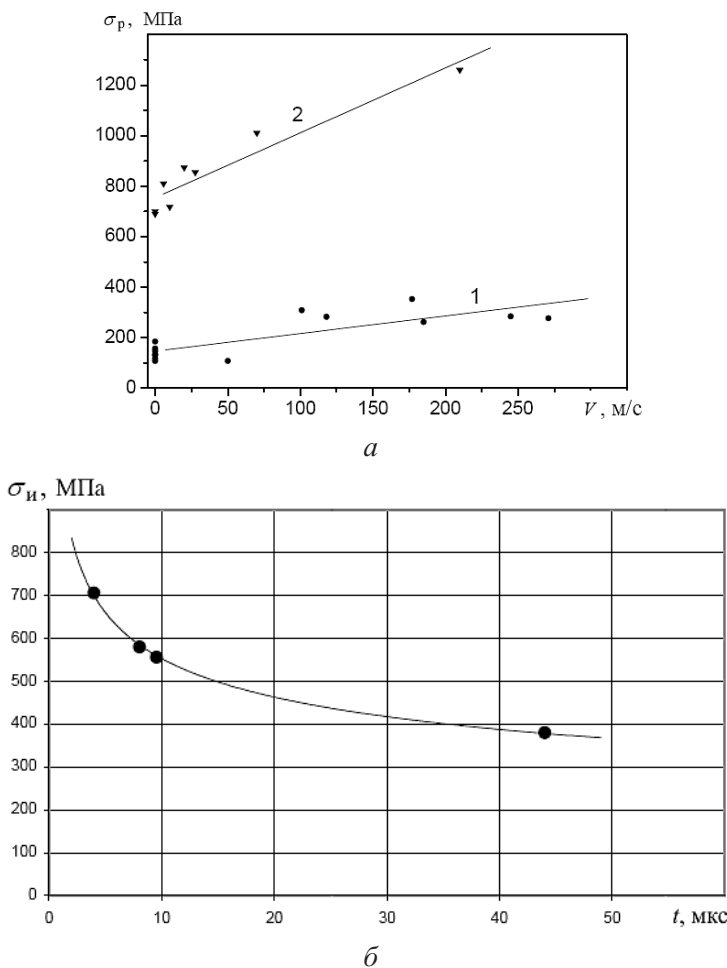


Рис. 8. Влияние скорости нагружения при ударных испытаниях на изменение прочности при растяжении σ_p образцов из карбида кремния (1) и стали 45 (2) – а и кинетика изменения прочности при изгибе σ_{II} образцов из карбида кремния (б).

Заклучение. Экспериментально исследована зависимость физико-механических свойств керамических материалов на основе самосвязанного карбида кремния, применяемых в качестве элементов ударостойких преград, от скорости нагружения. Впервые показано, что повышение скорости нагружения вплоть до скоростей ударного нагружения $2 \cdot 10^{-6} \dots 270$ м/с приводит к увеличению их прочности практически в два раза, т.е. до 700 МПа.

Т а б л и ц а 2

Результаты испытаний при круговом изгибе в условиях статического и ударного нагружения керамических пластин на основе карбидов кремния и бора

Материал и способ его спекания	ρ , г/см ³	V , м/с	E , ГПа	$\varepsilon_{\max} \cdot 10^{-2}$, %	$\sigma_{\text{н}}^{\text{р}}$, 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–Si (PC)	3,20	50	428,5	5,07	217
SiC (ГП)	3,03	56,7	369,3	10,29	380*
SiC + B ₄ C (“усы”) Si (PC)	2,96	101	339,6	18,16	618
SiC–Si (PC)	2,51	107	425,3	13,70	566*
B ₄ C (ГП)	3,19	118	425,3	13,30	580*
SiC (ГП)	3,08	177	403,2	17,50	706*
SiC–Si (PC)	3,19	185	426,0	12,30	524
SiC (ГП)	3,08	245	403,1	14,10	568
SiC–Si (PC)	2,95	271	328,6	1,69	554

Примечание. Звездочкой отмечены выбранные данные испытаний; ε_{\max} – максимальная деформация при разрушении; $\sigma_{\text{н}}^{\text{р}}$ – расчетная прочность при круговом изгибе.

Резюме

Описано методики випробувань керамічних матеріалів на основі самозв'язаного карбиду кремнію за статичного і динамічного (ударного) навантаження. Наведено результати досліджень впливу швидкості навантаження на змінення міцності керамічних матеріалів, що використовуються як елементи ударостійких перешкод.

1. *Neshpor V. S., Zaitsev G. P., Maystrenko A. L., et al.* The armour ceramics ballistic efficiency evaluation // Abstr. of 8th CIMTEC World Ceramics Congress Forum New Materials (Florenca, Italy). – 1994. – P. 102.
2. *Rozenberg O. A., Maystrenko A. L., Kulich V. G., and Shestakov S. I.* Peculiarities of manufacturing and properties of high-density silicon carbide-based armored ceramics // Proc. 5th Int. Armament Conf. (Waplevo, Poland). – 2004. – P. 11 – 13.
3. *Вишняков Л. П., Мазна О. В., Нешипор О. В. та ін.* 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* // Рекламный буклет Ирпенского комбината “Перемога”. – Ирпень, 1997. – 11 с.

5. *Бронезащита* // Рекламный буклет НПП “Темп-3000”. – Ирпень, 2006. – 21 с.
6. *CoorsTek Ceramic Armor Materials Properties / Ceramic Armor – Ceramic Materials for Vehicular and Personal Armor Applications from CoorsTek.htm* // Source: CoorsTek, Date added: Sept. 18, 2006. – www.azom.com.
7. *CRAIG International – NIJ III/IV Armour Ballistic Plates Ballistic & Riotelms. Ballistic Plates (SAPI) ... Material, Silicon Carbide (SiC) / Aramid Composition ... CRAIG International Ballistics 2000–2007.* – www.ballistics.com.au.
8. *Кулич В. Г., Куц В. И., Ткач В. Н., Майстренко А. Л.* К вопросу о возможностях получения высокоплотных керамических изделий на основе самосвязанного карбида кремния // *Сверхтвердые материалы.* – 2009. – № 1. – С. 18 – 35.
9. *Харченко В. В., Майстренко А. Л., Бабуцкий А. И., Кондряков Е. А.* Особенности деформирования и разрушения пластин из хрупких материалов при ударном нагружении // *Пробл. прочности.* – 2002. – № 3. – С. 86 – 91.
10. *Глазовский Б. Д., Московенко И. Б.* Низкочастотные акустические методы в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1977. – 332 с.
11. *Barker L. M.* Short bar specimen for measurement K_{Ic} // *Fract. Mech. Ceramics.* – 1978. – No. 3. – P. 483 – 491.
12. *Болтон У.* Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. Карманный справочник. – 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., Олисов А. Н., Клепачко Я. Р.* Энергоемкость деформирования до разрушения заземленной по круговому контуру тонкой пластины при ударном нагружении // Там же. – 2001. – № 2. – С. 88 – 99.
15. *Степанов Г. В.* Упруго-пластическое деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – Киев: Наук. думка, 1991. – 287 с.
16. *Лошак М. Г.* Прочность и долговечность твердых сплавов. – Киев: Наук. думка, 1984. – 325 с.

Поступила 19. 11. 2008