

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КЕРАМИКИ “ИДЕАЛ” (КОМПОЗИТА АЛМАЗ–КАРБИД КРЕМНИЯ)

© 2023 г. В. Я. Шевченко¹, А. С. Орыщенко², А. Н. Беляков², *, С. Н. Перевислов^{1, 2}

¹Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,
наб. Макарова, д. 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

²НИЦ “Курчатовский институт” – ЦНИИ КМ “Прометей”,
Шпалерная ул., 49, Санкт-Петербург, 191015 Россия

*e-mail: anton_belyakov_n@mail.ru

Поступила в редакцию 29.06.2023 г.

После доработки 01.08.2023 г.

Принята к публикации 07.08.2023 г.

В работе исследован новый композиционный керамический материал алмаз–карбид кремния – “Идеал”. Определены его механические характеристики. Впервые проведено комплексное определение коэффициента Пуассона, модуля сдвига, модуля объемного сжатия и поперечная скорость звука. Коэффициент Пуассона близок от 0.008 до 0.01, что в свою очередь свидетельствует о абсолютно хрупком характере разрушения керамики “Идеал” при нагружении. Рассчитаны критерии, позволяющие оценивать разные материалы, используемые для бронезащиты.

Ключевые слова: коэффициент Пуассона, “Идеал”, композит алмаз–карбид кремния, механические свойства, упругие свойства, динамические свойства

DOI: 10.31857/S0132665123600401, **EDN:** EEEKRV

ВВЕДЕНИЕ

Композиционные материалы на основе алмазных частиц представляют большой интерес для различных применений, благодаря сочетанию таких свойств, как высокая твердость, высокая теплопроводность, повышенная износостойкость и др. [1, 2].

Синтез новой керамики осуществляется при пропитке жидким кремнием [3] пористых заготовок из алмазных частиц. В соответствии с реакционно-диффузионным механизмом Тьюринга образуется композиционный материал алмаз–карбид кремния [4], в результате на поверхности алмазных частиц формируются кристаллы в виде трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ), образуя “забор” Тьюринга [5–7]. Плотные слои SiC заполняют все пространства между алмазами и формируют монолитный композиционный материал алмаз–карбид кремния.

Полученная новая керамика “Идеал” характеризуется весьма высокими прочностными свойствами (выше только у монокристаллического алмаза), однако некоторые механические и упругие характеристики керамики “Идеал”, определяющие его динамические прочностные свойства, еще не изучены.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных компонентов использовали алмазные порошки с размером частиц 20–28 мкм (*Ds*) и 225–250 мкм (*Db*). Из порошков 30 об. % *Ds* + 70 об. % *Db* (состав 1),

Таблица 1. Физико-механические свойства керамики “Идеал” по сравнению с керамикой на основе SiC и B₄C

Материал	ρ , кг/м ³	E , ГПа	C_l , м/с	$\sigma_{изг}$, МПа	K_{1C} , МПа м ^{1/2}	HV , ГПа
“Идеал”, состав 1	3367	754	14967	405	4.5	62
“Идеал”, состав 2	3367	760	15034	425	4.7	64
“Идеал”, состав 3	3368	768	15108	420	4.8	68
Реакционно-спеченный SiC [9]	3050–3100	380–410	10200	380–400	3.5–4.0	20–21
Реакционно-спеченный B ₄ C [10]	2600–2650	380–420	11800	350–380	3.2–3.5	28–30

35 об. % *Ds* + 65 об. % *Db* (состав 2) и 40 об. % *Ds* + 60 об. % *Db* (состав 3) получали керамику в соответствии с технологией [8].

Плотность (ρ) образцов определяли методом гидростатического взвешивания. Предел прочности при трехточечном изгибе ($\sigma_{изг}$) определяли на разрывной машине Shimadzu AG-300kNX. Модуль упругости (модуль Юнга) (E) и продольную скорость звука в материале (C_l) определяли резонансным методом на установке ЗВУК-130, а поперечную (C_t) на экспериментальной установке, разработанной в СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. Твердость по Виккерсу (HV) и трещиностойкости (K_{1C}) методом индентирования на твердомере ТП-7р-1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-механические свойства керамики “Идеал”. При создании определенных условий (концентрация компонентов, температура пропитки, давление среды и т.д.) реакционно-диффузионного взаимодействия на исходных частицах алмаза формируются зерна SiC — “забор” Тьюринга. Микроструктура материала алмаз–карбид кремния состоит из трижды периодических поверхностей, формируя монокристаллический материал, обладающий высокими механическими характеристиками (табл. 1).

Изучение упругих характеристик керамики “Идеал”. Коэффициент Пуассона определяется отношением относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению материала. Когда к объекту прикладывается внешняя сила, его длина увеличивается, а площадь поперечного сечения уменьшается. Коэффициент Пуассона показывает, насколько больше поперечная деформация изделия по сравнению с продольной деформацией при растяжении или сжатии. Зная это отношение и модуль Юнга, можно точно определить все упругие свойства любого изотропного материала. Для абсолютно хрупкого материала коэффициент Пуассона равен 0, для абсолютно несжимаемого вещества он равен 0.5 [11]. Существуют материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона, такие материалы называются ауксетичными, впервые они были описаны К. Эвансом [12].

Впервые были комплексно измерены и рассчитаны такие величины, как поперечная скорость звука C_t керамики “Идеал” (приведены в табл. 2) и коэффициент Пуассона. Построена зависимость коэффициента Пуассона (по формуле (1)) от отношения волновых скоростей в керамике “Идеал” (рис. 1).

Таблица 2. Физические свойства и скорости распределения волн в керамике “Идеал”

№ образца	Плотность ρ , кг/м ³	Скорость звука, м/с		Отношение скоростей	
		продольная (C_l)	поперечная (C_t)	C_l/C_t	C_l/C_t
1	3367	14967	10533	1.421	0.704
2	3367	15034	10572	1.422	0.703
3	3368	15108	10639	1.420	0.704

Таблица 3. Упругие свойства керамики “Идеал”

№ образца	ν	E , ГПа	K , ГПа	G , ГПа
1	0.0094	754	256	373
2	0.0108	760	259	376
3	0.0081	768	260	381

$$\nu = \frac{1 - 2\left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2}{2 - 2\left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2}, \quad (1)$$

$$G = E/2(1 + \nu), \quad (2)$$

$$E = \frac{C_l^2 \rho [(1 + \nu)(1 - 2\nu)]}{(1 - \nu)}, \quad (3)$$

$$L = E/3(1 - 2\nu), \quad (4)$$

$$G = C_t^2 \rho, \quad (5)$$

где G — модуль сдвига, L — модуль объемного сжатия и C_t — поперечная скорость звука.

В однородных изотропных твердых телах существуют два типа объемных волн с различной поляризацией колебаний относительно направления распространения скоростей продольной (C_l) и поперечной волн (C_t). Скорость распространения продольных волн всегда выше скорости распространения поперечных волн. Кроме того, для нормальных изотропных твердых тел как правило $C_l = \sqrt{2}C_t$. В табл. 2 представлены скорости продольной и поперечной волн для керамики “Идеал”.

Все упругие константы в твердом теле определяются, в основном, скоростями продольных и поперечных звуковых волн, и являются взаимосвязанными. В табл. 3 представлены расчетные данные упругих свойств керамики “Идеал”. Коэффициент Пуассона близок к 0, что в твердом теле считается признаком хрупкого разрушения, т.е. без пластической составляющей закона Гука. Исходя из значений коэффициента Пуассона можно заключить, что керамика “Идеал” ведет себя практически как абсолютно хрупкий материал. Полученный коэффициент Пуассона значительно меньше, чем у кристаллического алмаза $\nu = 0.07$.

Исходя из полученных данных можно оценить и другие свойства этой керамики. Обычно, при некоторых допущениях скорость Рэлеевской волны составляет [13]:

$$C_R = 0.9194C_t. \quad (6)$$

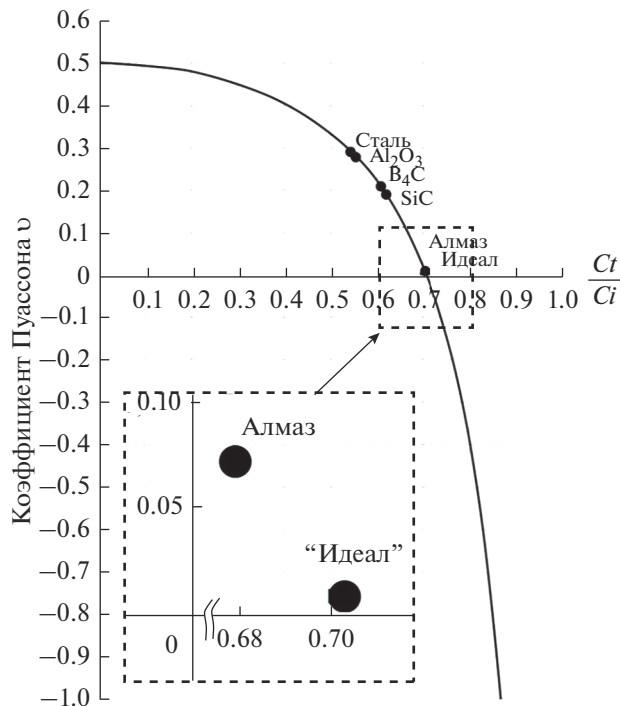


Рис. 1. Зависимость коэффициента Пуассона от отношения волновых скоростей.

Максимальная скорость трещины отождествляется со скоростью распространения Рэлеевских волн [14]. Известно, что при приложении импульсной нагрузки рост трещин резко ускоряется, по оценкам [15]:

$$r = \sqrt{\rho C_t^{3/2}}, \quad (7)$$

где r — радиус разрушения идеально хрупкого бесконечного тела, вызванного ассиметричным импульсом.

Разрушение является хрупким, если для его протекания и завершения достаточно упругой энергии разрушаемого тела.

Пластическое поведение керамики является только следствием хрупкого измельчения, и определяется разрывом связей между частицами [16].

Особо интересно рассмотреть упругие характеристики в рамках объяснения динамических характеристик материала. Рассмотрим процесс взаимодействия ударника и преграды последовательно.

При динамическом воздействии ударника на конструкцию, на первой стадии (0–9 мкс) трещины образуются вблизи границы раздела керамика–подложка из-за сдвиговых напряжений подложки и начинают расширяться по направлению движения ударника. На второй стадии (9–15 мкс) ударник разрушается, а керамика измельчается из-за множества трещин. После 15 мкс разрушение ударника и керамики прекращается, и оставшая энергия поглощается подложкой [17].

Для большинства керамик упругая волна, возникающая вследствие высокоскоростного удара, состоит из поверхностных волн (Рэлеевская волна), сдвиговых волн и волн сжатия [18].

Таблица 4. Распределение энергии ударной волны в комбинированной бронепреграде [21]

Энергия нагружения	Волны сжатия, %	Разрушение ударника, %	Волны сдвига		Воздействие на подложку, %
			герцинское разрушение керамики, %	измельчение керамики в зоне Мескала, %	
Малая	10	40	25	5	20
Большая	10	30	35	20	5

При средних скоростях динамического нагружения ($V_{уд} \ll C_l$) энергия рассеивается на торможение и разрушение ударника и материала преграды (керамика разрушается с образованием так называемого “конуса” Герца – радиальных и круговых трещин, образуя зону Мескала и измельчая керамику в ней) [19]. В этих зонах пластичность (или квазипластичность) керамики играет важную роль.

При больших скоростях нагружения ($V_{уд} \geq C_l$) преобладают в основном эффекты, связанные с рассеиванием ударных волн в керамике и ее разрушением.

Квазипластичность можно охарактеризовать как возникновение упругой деформации перед катастрофическим разрушением материала [16].

Ударные волны сжатия в конце концов отражаются от задней поверхности как волны растяжения. Интерференция волн сжатия и растяжения усиливает волны сдвига в соответствующих местах преграды и приводит к разрушению (дроблению) материала.

В табл. 4 показана количественная оценка распределения энергии удара по комбинированной (керамика с подложкой) бронепреграде [20]. Все указанные в табл. 4 стадии рассеивания энергии ударной волны зависят от упругих характеристик керамики и ударника.

В упругом режиме давление, возникающее в волне сжатия, линейно пропорционально плотности и скорости ударной волны, так называемый “упругий импеданс”.

При высокоскоростном ударе зависимость сжатия материала от давления определяется упругим пределом Гюгонио (HEL), при котором материал начинает переходить в необратимый сдвиг. В керамике предел Гюгонио гораздо выше, чем в металлах. В общем случае этот предел может быть выражен как $\Delta_{HEL} = (1 - \nu)\sigma_{сж} / (1 - 2\nu)$, где $\sigma_{сж}$ – прочность при одноосном сжатии, ν – коэффициент Пуассона.

Факторами, определяющими способность рассеивать энергию в керамике, являются ее упругий импеданс и HEL. Эти величины связаны простыми отношениями упругих свойств материала [22].

Изучение упругих характеристик материала позволяет оценить его качество и возможность поглощать (рассеивать) энергию динамического нагружения, а также построить ряд материалов для выбора их в качестве преграды. Обычно используют несколько критериев из которых самыми распространенными являются критерий Шевченко (1984 г.) (коэффициент относительного проникновения ударника “ K ”) и критерий Ashby (1993 г.) (критерий “ M ”), которые позволяют оценивать материалы, используемые для различных защитных функций:

$$K = \frac{l_{пр}}{l_{стали}} = (\ln 2)^{\frac{2}{3}} \sqrt[3]{\frac{\rho_{стали} C_{l(стали)}^2}{\rho_{кер} C_{l(кер)}^2}}, \quad (8)$$

$$M = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho} = \frac{C_l}{\rho^{\frac{1}{2}}}. \quad (9)$$

Таблица 5. Критерии, позволяющие оценить материалы, используемые в качестве защиты

Образец	K	M	C_R , м/с
1	0.65	257.94	9683
2	0.65	259.09	9720
3	0.66	260.33	9781
Для сравнения			
Al_2O_3	0.83	160.03	6371
SiC	0.84	184.99	6696
B_4C	0.79	247.44	8451
Сталь	1.0	58.54	3363
Алмаз	0.59	286.94	11052

В табл. 5 приведены расчетные данные коэффициента относительного проникновения ударника “ K ” (критерия Шевченко [16, 23]) и критерия Ashby “ M ”, который позволяет оценивать материалы, используемые для бронезащиты [21], а также скорости Рэлеевских волн для керамики “Идеал” и других наиболее распространенных в качестве защиты материалов.

Анализ кривых коэффициента относительного проникновения ударника “ K ” и критерия “ M ” (рис. 2) показывает, что определяющими факторами оценки сопротивления различных материалов, в том числе и керамики, динамическому нагружению являются скорость звука и модуль упругости материала, что позволяет объяснить и изучить распространение ударных волн в керамике. Керамика “Идеал” характеризуется лучшими свойствами из существующих броневых материалов. Кроме того, используя эти фундаментальные характеристики, можно оценить множество других материалов с различной степенью устойчивости к динамическим нагрузкам.

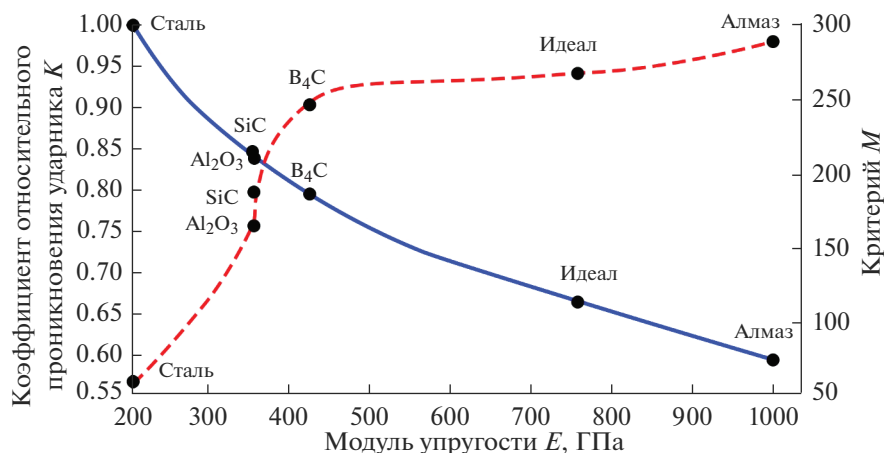


Рис. 2. Зависимость коэффициента относительного проникновения стального ударника в керамику “ K ” (сплошная линия) и критерий Ashby “ M ” (пунктирная линия) от модуля упругости для разных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые комплексно изучены механические свойства керамики “Идеал”. Определены коэффициент Пуассона, модуль сдвига, модуль объемного сжатия и поперечная скорость звука. Показано, что коэффициент Пуассона близок к 0, что свидетельствует о хрупком разрушении керамики “Идеал” при нагружении. Полученный коэффициент Пуассона значительно меньше, чем у кристаллического алмаза, что характеризует керамику “Идеал” как идеально хрупкий материал. Оценки показывают, что керамика “Идеал” является наилучшим защитным материалом.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда “Новые физические и химические принципы технологии металлических, металлокерамических и керамических материалов с управляемой макро-, микро- и наноструктурой и уникальными служебными характеристиками” (№ 21-73-30019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Knippenberg W.F.* Growth phenomena in silicon carbide // Philips Res. Report. 1963. V. 18. P. 161–274.
2. *Riedel R.* Handbook of ceramic hard materials. Wiley-VCH. 2000. 1020 p.
3. *Ковальчук М.В., Орыщенко А.С., Шевченко В.Я., Перевислов С.Н.* Композиционный материал. Патент № 2731703 С1 от 08.09.2020. Заявка № 2019136844 от 15.11.2019.
4. *Turing A.* The chemical basis of morphogenesis // Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B. 1952. V. 237. № 641. P. 37–72.
5. *Shevchenko V.Y., Kovalchuk M.V., Oryshchenko A.S.* New chemical technologies based on Turing reaction–diffusion processes // Doklady Chemistry. Pleiades Publishing. 2021. V. 496. № 2. P. 28–31.
6. *Shevchenko V.Y., Perevislov S.N., Ugolkov V.L.* Physicochemical interaction processes in the carbon (diamond)–silicon system // Glass Physics and Chemistry. 2021. V. 47. № 3. P. 197–208.
7. *Shevchenko V.Y., Perevislov S.N.* Reaction–diffusion mechanism of synthesis in the diamond–silicon carbide system // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2021. V. 66. № 8. P. 1107–1114.
8. *Ковальчук М.В., Орыщенко А.С., Шевченко В.Я., Петров С.Н.* Способ получения композиционного материала. Патент № 2732258 С1 от 14.09.2020. Заявка № 2019143480 от 19.12.2019.
9. *Perevislov S.N., Tomkovich M.V., Markov M.A., Kravchenko I.N., Kuznetsov Y.A., Erofeev M.N.* The influence of dispersed composition of SiC on the physico-mechanical properties of reactive-sintered silicon carbide // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. V. 49. P. 511–517.
10. *Perevislov S.N., Lysenkov A.S., Titov D.D., Omkovich M.V., Nesmelov D.D., Markov M.A.* Materials based on boron carbide obtained by reaction sintering // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2019. V. 525. № 1. P. 012074.
11. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика сплошных сред. Гостехиздат. 1953. 737 с.
12. *Evans K.E.* Auxetic polymers: a new range of materials. Endeavour. New series. 1991. V. 15. № 4. P. 170–174.
13. *Raileigh W.S.* On waves propagation along the plate surface of an elastic solid // Proc. London Math. Soc. 1887. V. 17. P. 4–11.
14. *Финкель В.М.* Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах. Изд-во Металлургия: М. 1970. 376 с.
15. *Черепанов Г.П.* О влиянии импульсов на развитие начальных трещин // Журнал ПМТФ. 1963. № 1. С. 97–103.
16. *Шевченко В.Я.* Введение в техническую керамику. М.: Наука. 1993. 114 с.
17. *Woodward R.* A simple one-dimension approach to modeling ceramic composite armor defeat // Int. J. Impact. Engng. 1990. V. 9. № 4. P. 455.
18. *Crouch J.G.* Introduction to armor materials. The Science of Armor Materials. 2017. Elsevier. Part I. P. 33.
19. *Hazell P.J.* Armor, Materials, Theory, Design, CRC Press. 2016. 231 p.
20. *Шевченко В.Я., Изотов А.Д., Лазарев В.Б., Жаворонков Н.М.* Энергия диссоциации и предельная упругая деформация в модели двухчастичного взаимодействия // Неорганические материалы. 1984. Т. 20. № 6. С. 1047–1052.
21. *Ashby M.F., Cebon D.* Materials selection in mechanical design // Le Journal de Physique IV. 1993. V. 3. № C7. P. 1–9.
22. *McCauley J.* An introduction to Materials by Design Including a Dynamic Stress Environment. Engineering ceramics: Current Status and Future Prospects, First edition. Ed. By T. Ohji and M. Singh, Published 2016 by J. Wiley and Sons, Inc.
23. *Шевченко В.Я., Орыщенко А.С., Перевислов С.Н., Сильников М.В.* О критериях выбора материалов преград механическому динамическому нагружению // Физика и химия стекла. 2021. V. 47. № 4. P. 365–375.