

УДК 548,546

**КЕРАМИКА «ИДЕАЛ»: АЛМАЗ-КАРБИДОКРЕМНИЕВЫЙ КОМПОЗИТ
ДЛЯ ЛЕГКОЙ КЕРАМИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ**

© 2024 г. Шевченко В. Я.¹, Балабанов С. В.^{1, *}, Перевислов С. Н.¹,
Сычев М. М.^{1, 2}, Чекуряев А. Г.²

¹НИИЦ “Курчатовский институт”, Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова,
199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет),

190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., 26

*e-mail: sergeybalabanov@yahoo.com

Поступила в редакцию 23.07.24

После доработки 10.09.24

Принята к публикации 13.09.24

В работе исследованы защитные свойства двуслойных защитных панелей на основе алмаз-карбид кремниевого керамического материала «Идеал» в сравнении с панелью, включающей корундовые плитки. Впервые проведена оценка фракционного состава осколков, сформировавшихся после динамического испытания панелей, определена суммарная поверхностная энергия образовавшихся мелких осколков. Показано, что керамика «Идеал» близка по свойствам к идеально хрупкому материалу, вследствие чего она обеспечивает эффективное рассеяние кинетической энергии и разрушение индентора. Установлено, что при хрупком разрушении керамики «Идеал» наблюдается образование транскристаллитных трещин, что доказывает высокую прочность межфазных связей в материале.

Ключевые слова: осколки, керамика, защита, керамика «Идеал», композит алмаз-карбид кремния

DOI: 10.31857/S0132665124060019, **EDN:** DXAWKW

ВВЕДЕНИЕ

Прочность хрупких керамических материалов во многом определяется параметрами их структуры, в частности наличием пор, размерами и формой частиц твердой фазы, фазовым составом, микротрещинами и т.д.

В любом хрупком материале при разрушении возникают новые поверхности с разделением тела на части за счет перераспределения напряжений.

Предложенная в 1981 г. академиком В.Я. Шевченко отечественная комбинированная броня «двухслойка» (рис. 1), состоящая из керамической хрупкой преграды и пластичной подложки, эффективно поглощает энергию проникающего тела. При этом диссипация кинетической энергии индентора происходит комплексно, преобразуясь в различные виды энергии.

При проникновении индентора в хрупкое, аморфное или кристаллическое твердое образуется полный или частичный конус деформации – конус Герца [1].

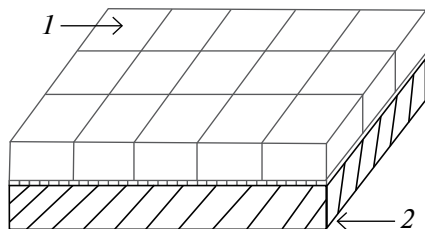


Рис. 1. Двухслойная керамическая защита:
1 — керамические плитки, 2 — подложка.

Общая картина разрушения двухслойной бронепреграды является весьма сложной и включает несколько процессов [2, 3]. В частности, происходит хрупкое разрушение керамики, разрушение индентора, упругая и пластическая деформация подложки, также энергия затрачивается на кинетическую энергию осколков и распространение волн.

Энергетический баланс процесса можно записать следующим образом:

$$E_{\text{кин}} = E_{\text{к}} + E_{\text{и}} + E_{\text{п}} + E_{\text{о}} + E_{\text{в}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{к}}$ — разрушение керамики (хрупкое), $E_{\text{и}}$ — разрушение индентора, $E_{\text{п}}$ — упругая и пластическая деформация подложки, $E_{\text{о}}$ — кинетическая энергия осколков, $E_{\text{в}}$ — распространение волн, $E_{\text{кин}}$ — кинетическая энергия индентора, определяемая по формуле

$$E_{\text{кин}} = \frac{mV^2}{2}. \quad (2)$$

Для эффективной защиты в современных двухслойных панелях используют керамические материалы, поскольку именно они определяют эффективность работы изделия в целом.

Рассмотрим составляющую $E_{\text{к}}$ в формуле (1) — энергию хрупкого разрушения керамики. А. Гриффитс заложил основы механики хрупкого разрушения, добавив к теории упругости еще одну постоянную — поверхностную энергию. При разрушении материал поглощает определенное количество механической энергии, поэтому, сравнивая различные виды воздействия, целесообразно определить поглощенную материалом энергию, а процесс разрушения характеризовать эффективной поверхностной энергией [4].

Удельная поверхностная энергия W_p равна изменению свободной энергии рассматриваемого тела. Суммарное изменение свободной энергии H_p при образовании новой поверхности S (суммарная поверхностная энергия) определяется поверхностным интегралом [5]

$$H_p = \int_S W_p dS. \quad (3)$$

Площадь поверхности разрушения вычисляется с учетом фракционного состава раздробленного материала. Определение величины вновь образованной поверхности производится исходя из допущения, что осколки имеют форму шара.

Суммарная поверхность осколков после дробления образца определяется по выражению

$$S = \sum_{i=1}^n k_i \pi d_i^2, \quad (4)$$

где k_i — количество осколков данной фракции, d_i — эквивалентный диаметр осколков i -той фракции.

(a)



(б)



Рис. 2. Фотографии панелей на основе керамики после воздействия индентора: *a* – корунд, *б* – керамика «Идеал».

При разрушении хрупких материалов энергия тратится не только на образование новых поверхностей, но и на упругую деформацию измельчаемого тела. Вся работа дробления E_k складывается из работы A_y , затрагиваемой на деформирование дробимого тела, и работы A_s , расходуемой на образование новой поверхности.

Согласно формуле дробления академика П.А. Ребиндера [6],

$$E_k = A_y + H_p, \quad (5)$$

где A_y – предельная энергия упругой деформации, H_p – предельная энергия упругой деформации и энергии образованной поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

«Идеал» – новый тип реакционно-спеченного композиционного материала, который получен реакционным спеканием путем заполнения пор заготовки из алмазных частиц расплавом жидкого кремния до получения беспористой композитной структуры. Благодаря практически полному отсутствию пор и прочной межфазной связи композит «Идеал» обладает высокими физико-механическими характеристиками [7–9]. В таком материале формируются структуры с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ). Известно, что формирование ТППМЭ на микро- и макроуровнях позволяет достигать высоких механических свойств [10, 11]. Математические основы формирования регулярных структур с геометрией ТППМЭ описаны С. Хайдом в работе [12].

Испытания динамических свойств двухслойных керамических панелей из керамики «Идеал» и корунда осуществляли в соответствии с ГОСТ 34286-2017.

За счет дробления керамики при динамическом воздействии индентора происходит диссипация энергии ударной волны до минимального значения. Керамика дробится, формируя конус Герца (рис. 2).

На основе проведенных испытаний установлены следующие закономерности. При попадании индентора в керамику количество осколков и размер конуса

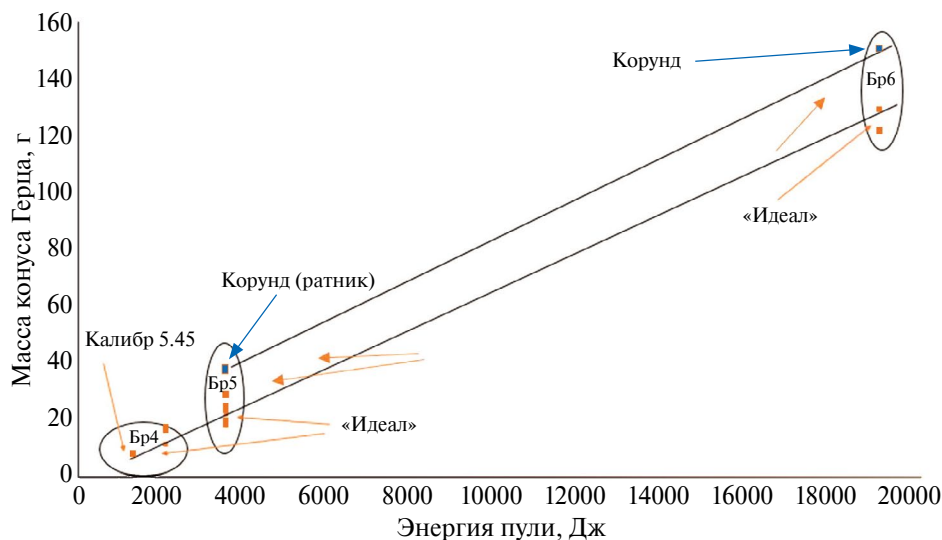


Рис. 3. Зависимость массы сформировавшегося конуса Герца от энергии индентора. Синие точки относятся к панелям на основе корунда, оранжевые — к панелям на основе керамики «Идеал».

Герца зависят от энергии индентора и толщины керамики (см. рис. 3, 4). Конус Герца формируется из образовавшихся после вылета осколков остатков керамических плиток бронепанели.

Из данных рис. 3 следует, что масса сформировавшегося конуса Герца прямо пропорциональна кинетической энергии индентора, которая определяется массой и скоростью индентора по формуле (2). Масса конуса для керамических пластин из «Идеала» меньше, чем для корундовых пластин, при одинаковой энергии индентора, что говорит о большей энергоемкости этого материала по сравнению с корундом.

Параметры конуса Герца (размер основания конуса, объем и масса) зависят от толщины керамической пластины, это связано с количеством выбиваемого индентором материала (см. рис. 4).

Для оценки распределения по размерам образующихся осколков были испытаны панели по классу Бр6 индентором диаметром 12.7 мм. После проведенных испытаний собирали мелкую фракцию разрушенной керамики. Керамику разделяли на 5 фракций просевом через систему сит с размерами отверстий 5, 1, 0.63, 0.25, 0.125 мм. За диаметр частиц каждой из фракций принимали среднюю величину диаметра отверстий верхнего сита и сита, на котором данная фракция задерживалась. Массу каждой фракции взвешивали на аналитических весах.

Для расчета площади поверхности всех образовавшихся мелких осколков использовали формулу (4).

Расчет поверхностной энергии образовавшихся мелких осколков при разрушении керамики производили по формуле (3). Для расчета поверхностной энергии использовали литературные данные по значениям удельной поверхностной энергии [13, 14]. Свойства испытанных панелей представлены в табл. 1.

Необходимо отметить, что условия проведения эксперимента не позволяют собрать абсолютно все осколки, поэтому точно оценить энергию, затраченную

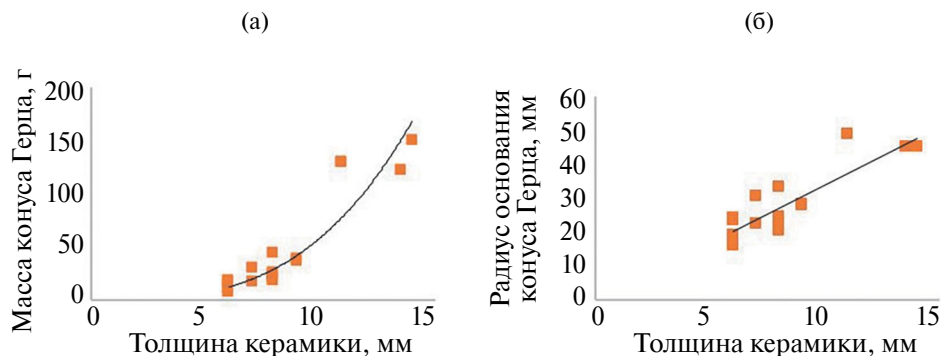


Рис. 4. *a* – Зависимость массы конуса Герца от толщины керамики; *б* – зависимость радиуса основания конуса Герца от толщины керамики.

Таблица 1. Свойства испытанных двухслойных бронепанелей

Характеристики	Al ₂ O ₃	Идеал	Идеал
Плотность керамики ρ , г/см ³	3.9	3.35	3.35
Размер керамической плитки, мм	65 × 65 × 14	65 × 65 × 13.5	65 × 65 × 11
Материал подложки	Арамидная ткань (Тварон)	Арамидная ткань (Тварон)	Сплав АМг6
Связующее	Клей (0.1 мм)	Клей (0.1 мм)	Клей (0.1 мм)
Упаковка	Запакован в пакет из арамидной ткани (Тварон)	Запакован в пакет из арамидной ткани (Тварон)	Запакован в пакет из арамидной ткани (Тварон)

на образование новых поверхностей достаточно сложно. Однако результаты эксперимента позволяют оценить разницу в баллистических свойствах исследуемых материалов. Суммарная поверхностная энергия мелких осколков различных фракций фракциям представлена на рис. 5. Наибольший вклад в формирование новой поверхности вносят наиболее мелкие осколки, а их количество максимально.

В табл. 2 представлены характеристики образовавшихся мелких осколков в результате разрушения керамической бронепанели. Энергия, потраченная на упругую деформацию материала, рассчитана по формуле (3).

Керамика «Идеал» обладает уникальными механическими характеристиками, в частности, имеет экстремально низкий коэффициент Пуассона $\mu = 0.008$, поэтому можно утверждать, что данная керамика по свойствам приближается к идеально хрупкому материалу [7]. Благодаря этому керамика «Идеал» обеспечивает более эффективное поглощение кинетической энергии индентора. При этом уровень сдвиговых и растягивающих напряжений в соседних с взаимодействующей с индентором керамических плитках не превышает предела прочности керамики и не приводит к их разрушению. Таким образом, процессы рассеяния кинетической энергии индентора в керамике «Идеал» смещаются в упругую область, что обеспечивает повышение «живучести» защиты на ее основе.

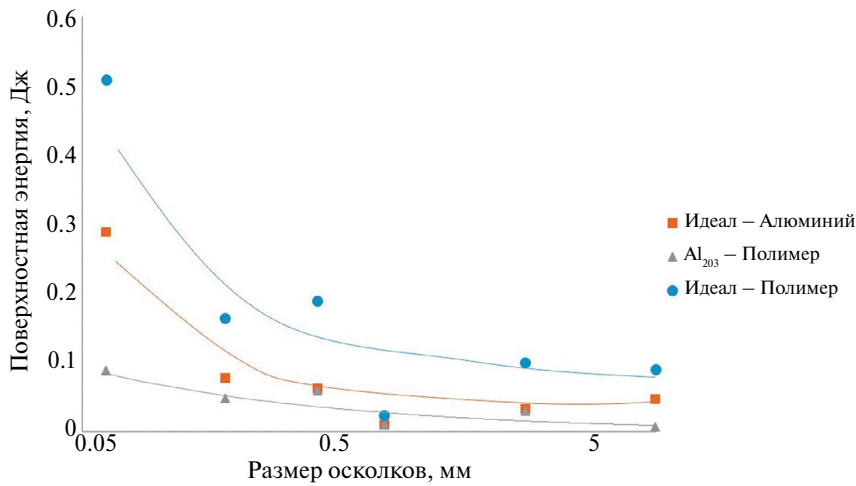


Рис. 5. Поверхностная энергия осколков.

Таблица 2. Характеристики мелких осколков, образованных при испытании

Характеристики	Корунд (арамид- ная ткань)	Идеал (арамид- ная ткань)	Идеал (АМг6)
Масса осколков m , г	40.0	128.1	60.6
Объем осколков V , см ³	10.0	38.3	18.1
Площадь поверхности осколков S , см ²	690	1860	900
Удельная поверхностная энергия W_p , Дж/м ²	3.86	5.79	5.79
Суммарная поверхностная энергия осколков N_p , Дж	0.25	1.1	0.52
Энергия потраченная на упругую деформацию материала, Дж	30.2	85.3	40.3

При сопоставимой толщине плиток количество и суммарная поверхностная энергия образовавшихся мелких осколков больше у керамики «Идеал». Глубина проникновения индентора меньше, фрагменты ударника после разрушения также меньше, т.е. большое количество энергии проникающего тела тратится на разрушение индентора. При разрушении керамики «Идеал» наблюдается транс-кристаллитное разрушение, т.е. адгезия на границе раздела алмаз – карбид кремния достаточно высокая (рис. 6).

Следует указать также на существенно меньшую поверхностную плотность панели, включающей плитки из керамики «Идеал».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что использование высокоэффективной композитной керамики и энергоемкой подложки позволяет увеличить поглощение энергии на хрупкое разрушение и упругую деформацию керамического материала более чем в 2 раза.

Керамика «Идеал» (композит алмаз-карбид кремния) дробится в месте контакта с индентором, благодаря чему поглощается большое количество кинетической энергии индентора. Она обладает уникальными механическими характеристиками (имеет экстремально низкий коэффициент Пуассона $\mu = 0.008$), поэтому можно утверждать, что по свойствам она приближается к идеально хрупкому материалу. Все перечисленные преимущества керамики «Идеал» позволяют получить низкую поверхностную плотность панелей, включающей плитки из этой керамики

Следовательно, керамика «Идеал» — наиболее эффективный и перспективный материал для защиты от динамических нагрузений.

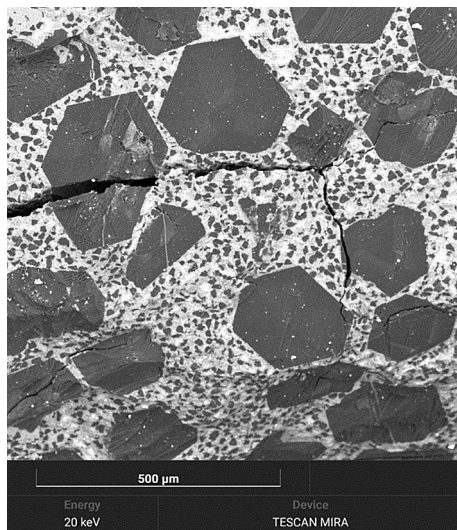


Рис. 6. Транскристаллитное разрушение керамики «Идеал».

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Изготовление плиток из материала «Идеал» выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-13-00054).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. Т. 47. № 4. С. 365–375.
2. Shevchenko V.Ya., Dolgin A.S., Sychoy M.M., Makogon A.I., Perevislov S.N. Ideal: A promising diamond-silicon carbide composite for enhanced ceramic armor // Ceramics International. 2024. V. 50. Is. 3. Pt. A. P. 4264–4273.
3. Brandon D.G. Armor // Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials / Ed. by R.J. Brook. Oxford: Pergamon, 1991. P. 22–25.
4. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
5. Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С. Метод вычисления поверхностной энергии и энергии адгезии упругих тел // Вестник ПНИПУ. Механика. 2013. № 1. С. 235–259.
6. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика дисперсных структур: Сборник статей / Отв. ред. акад. П.А. Ребиндер. М.: Наука, 1966. 400 с.
7. Шевченко В.Я., Орыщенко А.С., Беляков А.Н., Перевислов С.Н. Определение механических характеристик керамики «идеал» (композита алмаз–карбид кремния) // Физика и химия стекла. 2023. Т. 49. № 6. С. 573–579.

8. Сильников М.В., Шевченко В.Я., Михайлин А.И. Композитные органокерамические панели для защиты от пуль калибра 7.62 мм и 5.45 мм с термоупрочненным сердечником на основе керамики алмаз-карбид кремния с регулируемой взаимосвязанной структурой // Известия Российской Академии ракетных и артиллерийских наук. 2021. № 3 (118). С. 107–113.
9. Shevchenko V.Ya., Oryshchenko A.S., Perevislov S.N., Silnikov M.V. About the criteria for the choice of materials to protect against the mechanical dynamic loading // Glass Physics and Chemistry. 2021. V. 47. № 4. P. 281–288.
10. Shevchenko V.Ya., 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.
11. Shevchenko V.Ya., Balabanov S.V., Sychov M.M., Karimova L.M. Prediction of Cellular Structure Mechanical Properties with the Geometry of Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) // ACS Omega. 2023. V. 8. № 30. P. 26895–26905.
12. Fogden A., Hyde S. Parametrization of triply periodic minimal surfaces. I. Mathematical basis of the construction algorithm for the regular class // Acta Cryst. A. 1992. V. 48. P. 442–451.
13. Nagornov Y.S. Thermodynamics of silicon carbide nucleation during the carbonization of nanoporous silicon // Technical Physics. 2015. V. 60. № 5. P. 700–709.
14. Magomedov M.N. On self-diffusion and surface energy under compression of diamond, silicon, and germanium // Technical Physics. 2013. V. 58. № 12. P. 1789–1799.