

05.1;05.3;06.1;06.4;06.5

Структурная перестройка керамического материала, инициируемая высокоскоростным ударом

© В.Я. Шевченко¹, А.И. Козачук², А.И. Михайлин³, С.Н. Перевислов⁴, Б.В. Румянцев²¹ Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Россия² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия³ АО „НПО Спецматериалов“, Санкт-Петербург, Россия⁴ НИЦ „Курчатовский институт“ — ЦНИИ КМ „Прометей“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: brum@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 5 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 20 декабря 2022 г.

Принято к публикации 25 декабря 2022 г.

Рассматривается применение высокомодульных керамических материалов в условиях, моделирующих экранную защиту космических объектов от повреждений фрагментами техногенного мусора. Экспериментально исследовалось внедрение алюминиевой струи со скоростью ~ 10 km/s в алюминиевую преграду, расположенную после экранов из хрупких материалов. Сравнительный анализ параметров остаточной каверны в преграде позволил выявить влияние структурной перестройки керамического материала на эффективность экранной защиты.

Ключевые слова: экранная защита, техногенный мусор, керамические материалы.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.05.54665.19449

Одним из способов исследования материалов в экстремальных условиях является изучение высокоскоростного взаимодействия твердых тел. Актуальность таких исследований определяется, например, проблемой безопасности космических полетов, которая возникла после катастрофического увеличения концентрации техногенного мусора в околоземном пространстве.

В основном проблема защиты космических объектов от высокоскоростного компактного ударника решается применением экранов [1], которые эффективно работают при скоростях компактного ударника менее 7–8 km/s [2]. В [3] была исследована эффективность экранной защиты (ЭЗ) для более опасных условий воздействия фрагментов техногенного мусора.

Цель настоящей работы — в условиях [3], моделирующих столкновение фрагмента техногенного мусора с дюралевой конструкцией космических объектов, оценить эффективность применения высокомодульных хрупких материалов в экранной защите за счет откольных [4] и других явлений, отвечающих за быстроту ответной реакции экрана на удар.

В табл. 1 представлены физико-механические характеристики применяемых хрупких материалов. В числе новых керамических материалов исследовался композит „Идеал“, механические свойства которого превосходят свойства реакционно-спеченных материалов на основе карбида кремния и карбида бора [5–8] и стекла (для сравнения). Высокие механические характеристики (скорость звука, твердость и прочность) композиционного материала „Идеал“ определяются основным содержанием кристаллов алмаза.

Исследование кинетики внедрения удлиненного ударника в керамические материалы [9] показывает, что

конечный результат внедрения ударника коррелирует с пределом прочности к изгибу. Численное моделирование (см. рисунок, *a*) подтвердило механизм проявления прочности материала [10], когда разгрузка области внедрения удлиненного металлического ударника в керамику сопровождается разрушением стенок каверны с образованием откольных фрагментов. Последние через некоторое время задержки схлопываются на ударник, разрушают и дестабилизируют дальнейшее его внедрение. Степень разрушения ударника, нарушение внедрения зависят от соотношения физико-механических характеристик и геометрических параметров ударника и преграды из керамики.

По мере увеличения скорости удара могут проявляться и другие обстоятельства, отвечающие новым условиям преобразования кинетической энергии ударника при взаимодействии с материалом преграды, например фазовые и структурные превращения при высоких давлениях. Так, в работе [3] показана эффективность применения экранов из материалов, способных к быстрой радиальной реакции на высокоскоростное внедрение удлиненного ударника за счет частичного плавления и испарения при взаимодействии с ЭЗ.

Предварительные результаты численного моделирования действия высокоскоростного алюминиевого ударника на керамические экраны из карбида бора (И.В. Гук, 2019, не опубликовано) показывают образование откольных фрагментов в области взаимодействия, но не отражают последствий дестабилизации удлиненного ударника при дальнейшем внедрении (см. рисунок, *b*), как это видно из рисунка, *a* при внедрении в массив керамики.

В табл. 2 приведены экспериментальные результаты определения эффективности ЭЗ с фиксированным рас-

Таблица 1. Характеристики хрупких материалов

| Наименование материала | Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, kg/m ³ | Скорость звука, km/s | | Твердость H_V , GPa | Предел прочности на изгиб, GPa |
|------------------------|--|----------------------|-------|-----------------------|--------------------------------|
| | | C_l | C_t | | |
| „Идеал“ [5,6] | 3.3 | 14.6 | – | 63–68 | 0.43–0.48 |
| Карбид бора [7] | 2.52 | 14 | 8.8 | 30 | 0.44 |
| Карбид кремния [8] | 3.1 | 12 | 7.7 | 25–30 | 0.40–0.42 |
| Силикатное стекло | 2.5 | 5.9 | 3.6 | 5.5 | 0.15 |

Таблица 2. Экспериментальные результаты определения эффективности ЭЗ из различных материалов по защите преграды из АМГ6 при действии удлиненного алюминиевого ударника с начальной скоростью 10 km/s

| Номер п/п | Материал экрана | Плотность материала $\rho \cdot 10^{-3}$, kg/m ³ | Количество экранов | Суммарная толщина, см | m^* , g/cm ² | Глубина каверны L , см | Объем каверны V , cm ³ | S_L | S_V |
|-----------|-----------------|--|--------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------|-------|
| 1 | – | – | – | – | – | 11.3 ± 0.4 | 10.8 ± 0.5 | 0 | 0 |
| 2 | „Идеал“ | 3.33 | 2 | 0.64 | 2.1 | 8.8 | 3.6 | 0.23 | 0.67 |
| 3 | АМГ6 | 2.7 | 2 | 0.66 | 1.8 | 8.5 | 4.4 | 0.25 | 0.59 |
| 4 | Стекло | 2.5 | 2 | 0.70 | 1.8 | 9.2 | 6.9 | 0.19 | 0.42 |
| 5 | Карбид бора | 2.52 | 2 | 0.8 | 2.0 | 9.1 | 4.2 | 0.20 | 0.61 |
| 6 | Карбид бора | 2.52 | 1 | 0.82 | 2.1 | 8.9 | 4.2 | 0.22 | 0.61 |
| 7 | „Идеал“ | 3.33 | 1 | 1.0 | 3.3 | 5.5 | 3.6 | 0.52 | 0.69 |

*Масса единицы площади экранов.

стоянием между экранами и преградой (см. рисунок, *b*) при действии фрагмента техногенного мусора на алюминиевую преграду. Организация эксперимента получения алюминиевого ударника длиной 3 см, диаметром 0.07 см с градиентом скоростей от 10.2 до 3.7 km/s приведена в [3]. Применение избыточной по толщине преграды из алюминиевого сплава АМГ6 позволяло сохранить каверну и избежать влияния тыльной поверхности.

Эффективность ЭЗ оценивалась по относительному снижению параметров поражения преграды при наличии экранов по глубине S_L и объему S_V :

$$S_L = 1 - L_i/L_0, \quad S_V = 1 - V_i/V_0,$$

где L_i и V_i — глубина и объем каверны в преграде после экранов (наличие ЭЗ), L_0 и V_0 — глубина и объем каверны в преграде при отсутствии экранов.

Из табл. 2 (строки 2–5) видно, что экраны из различных материалов уменьшают пробитие на 20–25% относительно поражения без экранов, что свидетельствует об одинаковых уровнях локального срабатывания головной части удлиненного ударника на ЭЗ при постоянстве линейной массы. Влияние прочности материала экрана не проявляется при постановке эксперимента с высокоскоростным соударением.

Снижение объема каверны в преграде при наличии экранов пропорционально уменьшению поглощенной энергии ударника за счет его рассеивания между экранами и преградой. Дополнительное уменьшение объема каверны в случае выполнения экранов из хрупких материалов, например, по отношению к уровню для экранов из

АМГ6 (строка 3) объясняется вторичным радиальным дестабилизирующим действием на удлиненный ударник откольных масс керамических экранов (см. рисунок, *b*). При этом должно соблюдаться следующее условие: время пролета ударника должно превышать время радиальной реакции (схлопывания) откольных фрагментов экрана. Из-за относительно малой толщины экрана радиальное действие на пролетающий ударник ослаблено и проявляется сильнее при увеличении толщины экрана (см. рисунок, *a* и *b*).

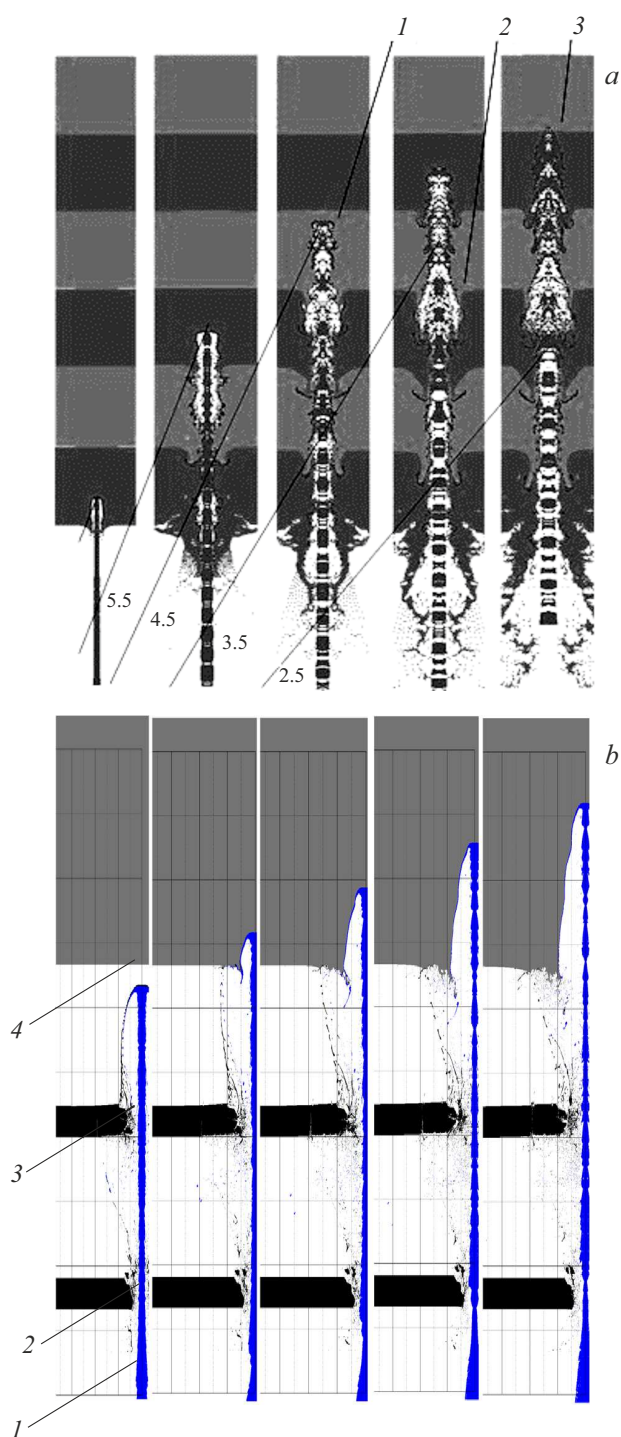
Преимущество экрана из керамики „Идеал“, выражающееся в наибольшем значении по рассеиванию ударника $S_V = 0.67$ и 0.69 (строки 2, 7 в табл. 2), может быть обусловлено:

— наличием структурного фазового превращения алмаза в графит при разгрузке зоны внедрения ударника в экран с увеличением удельного объема при давлении 25 GPa [11];

— высокой скоростью звука и соответственно высокими акустическим импедансом, прочностными характеристиками, в том числе и откольной прочностью, определяющей скорость схлопывания фрагментов при разрушении поверхности каверны.

Значительное уменьшение глубины каверны $S_L = 0.52$ (строка 7 в табл. 2) объясняется последствиями сильного повреждения ударника в достаточно „толстом“ экране (см. рисунок, *a*) [9].

Как и в случае испарения меди [3], появление при разгрузке зоны внедрения фазы с меньшей плотностью оказывает возмущающее действие на ударник, дестабилизирует его направленное действие и увеличивает



a — численное моделирование внедрения медного ударника с начальной скоростью 6.6 km/s в массив карбида кремния (слои по 1 см) в моменты времени 1, 8, 15, 22 и 29 μ s (слева направо) [10]. Наклонные прямые — траектории элементов ударника с обозначением скорости движения (в km/s). 1 — окончание гидродинамического внедрения, 2 — разрушение ударника, 3 — накопление фрагментов ударника на дне каверны. *b* — внедрение алюминиевого ударника (1) с начальной скоростью 10.2 km/s через экраны (2 и 3) из карбида бора в алюминиевую преграду (4) с интервалом 1 μ s. Движение ударника снизу вверх. Время увеличивается слева направо.

ет рассеивание фрагментов ударника между экранами и в преграде.

У сравнимого по прочности карбида бора отсутствуют модификации со значительным изменением плотности в твердом состоянии [12] в диапазоне давлений до 50 GPa; соответственно, результаты эффективности экранной защиты меньше (строки 5, 6 в табл. 2).

Следует отметить, что наблюдаемый эффект может проявляться только на удлиненном ударнике, когда время пролета ударника через область внедрения больше времени задержки образования и схлопывания продуктов взаимодействия ударника и экрана.

Скорость фазового превращения алмаз–графит составляет менее 10^{-8} s [13,14], что усиливает процесс схлопывания продуктов превращения на внедряющийся ударник при прохождении относительно тонких экранов.

Таким образом, экспериментально определены уровни снижения поражающей способности алюминиевого удлиненного ударника при скорости ~ 10 km/s при прохождении защитных экранов из хрупких материалов, таких как стекло, карбид бора и керамический композиционный материал алмаз–карбид кремния „Идеал“.

Показаны преимущества керамического материала „Идеал“ при высокоскоростном взаимодействии с удлиненным алюминиевым ударником.

Более высокая эффективность действия экранной защиты из керамики „Идеал“ обусловлена высокой скоростью звука в материале (до 15 km/s) и наличием структурного фазового превращения (алмаз–графит), идущего с увеличением удельного объема.

Финансирование работы

Работы по созданию керамического материала „Идеал“ выполнены в НИЦ „Курчатовский институт“ — ЦНИИ КМ „Прометей“ при финансовой поддержке в рамках гранта РФФИ № 21-73-30019.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] F. Whipple, *Astron. J.*, **52** (1161), 131 (1947). DOI: 10.1086/106009
- [2] IADC-04-03 v. 7, protection manual (2014).
- [3] Б.В. Румянцев, И.В. Гук, А.И. Козачук, А.И. Михайлин, С.И. Павлов, М.В. Сильников, *Письма в ЖТФ*, **47** (8), 15 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.08.50846.18672 [B.V. Rumyantsev, I.V. Guk, A.I. Kozachuk, A.I. Mikhailin, S.I. Pavlov, M.V. Sil'nikov, *Tech. Phys. Lett.*, **47**, 409 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021040271].
- [4] А.С. Савиных, Г.В. Гаркушин, С.В. Разоренов, В.И. Румянцев, *ЖТФ*, **85** (6), 77 (2015). [A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov, V.I. Rumyantsev, *Tech. Phys.*, **60**, 863 (2015). DOI: 10.1134/S1063784215060249].

- [5] V.Y. Shevchenko, S.N. Perevislov, V.L. Ugolkov, *Glass Phys. Chem.*, **47** (3), 197 (2021).
DOI: 10.1134/S108765962103010X
- [6] В.Я. Шевченко, С.Н. Перевислов, *ЖНХ*, **66** (8), 994 (2021).
DOI: 10.31857/S0044457X21080262 [V.Ya. Shevchenko, S.N. Perevislov, *Russ. J. Inorg. Chem.*, **66** (8), 1107 (2021).
DOI: 10.1134/S003602362108026X].
- [7] S.N. Perevislov, A.S. Lysenkov, D.D. Titov, M.V. Omkovich, D.D. Nesmelov, M.A. Markov, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **525** (1), 012074 (2019).
DOI: 10.1088/1757-899X/525/1/012074
- [8] D.D. Nesmelov, O.A. Kozhevnikov, S.S. Ordan'yan, S.N. Perevislov, *Glass Ceram.*, **74** (1), 43 (2017).
DOI: 10.1007/s10717-017-9925-0
- [9] Б.В. Румянцев, *ЖТФ*, **79** (6), 28 (2009). [B.V. Romyantsev, *Tech. Phys.*, **54** (6), 790 (2009).
DOI: 10.1134/S106378420906005X].
- [10] B.V. Romyantsev, V.Yu. Klimenko, *AIP Conf. Proc.*, **1426** (1), 56 (2012). DOI: 10.1063/1.3686220
- [11] В.Б. Розанов, М.А. Румянцева, *Крат. сообщ. по физике ФИАН*, № 3-4, 9 (1997).
- [12] A. Hushur, M.H. Manghnani, H. Werheit, P. Dera, Q. Williams, *J. Phys.: Condens. Matter*, **28** (4) 045403 (2016).
DOI: 10.1088/0953-8984/28/4/045403
- [13] <https://nplus1.ru/news/2017/11/24/X-ray-transition>
- [14] Г.И. Канель, Г.С. Безручко, А.С. Савиных, С.В. Разоренов, В.В. Милявский, К.В. Хищенко, *ТВТ*, **48** (6), 845 (2010).
[G.I. Kanel', G.S. Bezruchko, A.S. Savinykh, S.V. Razorenov, V.V. Milyavskii, K.V. Khishchenko, *High Temp.*, **48**, 806 (2010). DOI: 10.1134/S0018151X10060064].