

---

---

## О КРИТЕРИЯХ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ПРЕГРАД МЕХАНИЧЕСКОМУ ДИНАМИЧЕСКОМУ НАГРУЖЕНИЮ

© 2021 г. В. Я. Шевченко<sup>1, \*</sup>, А. С. Орыщенко<sup>2</sup>, С. Н. Перевислов<sup>1</sup>, М. В. Сильников<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,  
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

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

<sup>3</sup>Институт военно-технического обучения и безопасности Санкт-Петербургского  
политехнического университета Петра Великого,  
ул. Гидротехников, 5, Санкт-Петербург, 195251 Россия

\*e-mail: Shevchenko@isc.nw.ru

Поступила в редакцию 03.12.2020 г.

После доработки 26.01.2021 г.

Принята к публикации 05.02.2021 г.

Предложен и обоснован критерий выбора материалов для преград механическому динамическому нагружению. Обсуждаются механизмы разрушения хрупких керамических материалов, широко используемых в конструкциях, предохраняющих от проникания и весьма распространенных на практике. В отличие от других оценок, предложенная формула опирается на физический принцип сравнения полных энергий нагружения и преграды, и хорошо согласуется с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** преграда, упругие свойства, керамика, глубина проникания

**DOI:** 10.31857/S013266512104017X

### ВВЕДЕНИЕ

Под критерием понимают способность материала поглотить, рассеять, преобразовать энергию нагружения. Например, для ударника диаметром (калибром) 12.7 мм эта энергия составляет ~17 кДж (при скорости нагружения порядка 900 м/с и массе индентора 46 г).

М. Ashby в 1993 г. опубликовал классическую работу “Выбор материалов для проектирования технических приложений” [1] и ввел  $M$  “индекс материала  $M$ ”, который в полуколичественном виде позволяет оценивать материалы для защитных приложений.

$$M = \frac{E^{\frac{1}{2}}}{\rho} = \frac{C_l}{\rho^{\frac{1}{2}}},$$

где  $E$  – модуль Юнга, а  $\rho$  – плотность,  $C_l$  – продольная скорость звука в веществе.

Этот индекс справедлив (по Ashby) в условиях квазистатического нагружения. При больших скоростях нагружения все количество энергии нагружения распределяется за короткий период времени по всему объему материала. Для предотвращения разрушения материала (конструкции) и исключения проникания эта энергия должна быть по-

**Таблица 1.** Распределения энергии удара [1]

Толщина платины	Удар (поглоще- ние упругой энергии)	Dwell (деструк- ция ударника)	Spalling Герцево разрушение (зоны Мескала)	Spalling Измель- чение преграды (зоны Мескала)	Жесткость под- ложки (энергия поглощения подложки)
Тонкая	10	40	25	5	20
Толстая	10	30	35	20	5

гложена за счет упругих и неупругих деформаций, механизма разрушения, фазовых переходов, химических реакций и других механизмов.

### АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Рассмотрим процесс взаимодействия ударника и преграды последовательно.

Для большинства керамик упругая волна, возникающая вследствие высокоскоростного удара, состоит из поверхностных волн (Релеевская волна), сдвиговых волн ( $S$ -волна) и волн сжатия ( $P$ -волна). Волновая энергия нагружения грубо разделяется в таком соотношении: Релеевская волна 67%,  $S$ -волна – 26% и волна сжатия ( $P$ -волна) – 7% [2].

Общая картина удара является весьма сложной и включает несколько процессов.

При средних скоростях ( $v_{уд} \ll C_1$ ) материал ударника подвергается торможению за счет деструкции (dwell), материал преграды разрушается из-за Герцевого образования радиальных и круговых трещин и образования зон Мескала и измельчения керамики в них. В этих зонах пластичность керамики (или квазипластичность) играет важную роль. В табл. 1 из [2] представлены оценки затрат энергии удара по керамической преграде в комбинации с подложкой (“двухслойка”)<sup>1</sup>. Все указанные в таблице стадии связаны с упругими свойствами преграды. Термин “квазипластичность” был проанализирован в [3] и введен “индекс хрупкости”, который определен как величина напряжения сдвига для начала хрупкого разрушения с образованием трещин (табл. 1).

Квазипластичность можно определить как “все упругие деформации перед катастрофическим разрушением микротрещины” [4], возникающие из различных механизмов – нано и микро, т.е., например, двойникование, дислокации, границы зерен, амортизации, микротрещины, сколы, фазовые переходы, микроплавление, диссоциация, и т.п.

Распределение энергии в двухслойке из керамики и алюминия ударниками небольшого диаметра показывает, что затраты энергии ударника на разрушение керамики весьма незначительны (~2–10%). Главный механизм диссипации энергии заключается в пластической деформации подложки (20–40%) и ударника (10–15% dwell), а также энергии разрушения керамики за счет образования осколков (spalling) (40–70%) [5].

Термин дробление (spalling) означает измельчение материала от одного размера частиц к меньшему размеру этих частиц путем разлома, дробления, резки, вибропомола и других процессов. Это явление при ударе характерно для хрупких тел.

При ударе область деструкции образуется перед ударником и остается в зоне коноидального разрушения. Эту зону называют зоной Мескала (Mescall), который первым описал это явление при сверхзвуковом ударе, но также оно наблюдается и для обычных скоростей нагружения.

При ударе в хрупкое тело ударником происходит образование коноиды разрушения, радиальных трещин и круговых трещин [6]. Такой конус называют конусом Герца.

Для корунда определено, что в среднем одна радиальная трещина соответствует доле ~150 МПа развивающегося кольцевого напряжения. Число крупных радиальных

<sup>1</sup> Этот термин был введен В.Я. Шевченко еще в 1981 г. В зарубежной литературе эту конструкцию называют “Тандем”.

трещин зависит также и отражает точки изгибов, которые появляются в хрупком теле. Они формируются как некие концентрические окружности вокруг места удара и появляются после радиальных трещин, но имеют общую природу. Геометрия образца существенно влияет на процесс разрушения преграды и при соответствующих условиях может привести к полной эрозии ударника (Dwell).

Согласно [7] было установлено, что угол конуса увеличивается с увеличением коэффициента Пуассона для ударников большого диаметра и, таким образом, имеет большую баллистическую эффективность. При изменении коэффициента Пуассона от 0.1 до 0.3 угол меняется от  $60^\circ$  до  $70^\circ$ . Однако другие факторы, такие как скорость ударника, конструкция и жесткость подложки, также влияют на угол конуса разрушения.

Основание конуса Герца приблизительно составляет половину диаметра индентора плюс удвоение толщины пластины [8].

Две стадии разрушения существуют в материале, подвергнутом динамическому нагружению при больших скоростях нагружения ( $v_{уд} \geq C_1$ ). На второй стадии, когда значения скорости нагружения становятся порядка продольной скорости звука (разная для разных типов материалов) преобладают эффекты, связанные с распределением ударных волн. Уменьшение скорости нагружения приводит к разрушению за счет инерциальных эффектов, и адиабатический отклик преграды приводит к плавлению. На этой стадии увеличение энергии нагружения часто приводит к плавлению или испарению части преграды. Для керамик при скоростях нагружения, подходящих для соответствующих преград, режим отклика на упругую волну является определяющим процессом. В упругом режиме давление, возникающее в волне сжатия линейно пропорционально скорости материальной частицы, константа пропорциональности известна как “упругий импеданс” равный произведению плотности и скорости ударной волны, а скорость частицы равна скорости контактной поверхности. Отношение толщины преграды к толщине ударника является фактором, определяющим суперпозицию волн сжатия и разрежения. Зависимость сжатия реальных тел от давления при сжатии ударом определяется функцией Гюгоню и характеризует материал на кривой напряжение – деформация, как упругий предел Гюгоню (HEL), при котором материал начинает переходить в необратимый сдвиг.

В керамике HEL гораздо выше, чем предел прочности измельчения, который стремится к нулю, если давление импульса сжатия приближается к HEL. В общем случае HEL может быть выражен как  $\Delta_{HEL} = (1 - \nu)Y_c / (1 - 2\nu)$ , где  $Y_c$  – прочность на сжатие при одноосном сжатии, а  $\nu$  – коэффициент Пуассона. Это аналогично статическому нагружению керамики, у которой очень высокая прочность на сжатие и очень слабая на растяжение.

Таким образом, факторами, влияющими на диссипацию энергии в преграде, являются упругий импеданс и HEL. Другими факторами являются плотность, модуль упругости и статическая прочность на сжатие или твердость.

Однако, все эти величины связаны простыми соотношениями с динамическими свойствами [9].

Величины  $E$ ,  $G$ ,  $\nu$ ,  $K$  связаны соотношением:

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

$$K = E/3(1 - 2\nu).$$

В свою очередь

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

где  $E$ ,  $G$ ,  $\nu$  и  $K$  – модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент Пуассона и модуль объемного сжатия соответственно, а  $C_l$  – продольная скорость звука,  $C_t$  – поперечная скорость звука, причем обычно в твердых изотропных телах формула  $C_l \approx \sqrt{2} C_t$ . Верно также

$$C_t = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} = \sqrt{\left(K + \frac{4}{3}G\right)}/\rho.$$

для поперечной волны:

$$C_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

Все упругие константы в твердом теле определяются, в основном, скоростями продольных и поперечных звуковых волн и являются взаимосвязанными. Ударные волны сжатия в конце концов отражаются от задней поверхности как волны растяжения. Это погашает волны сжатия в материале. Интерференция волн сжатия и растяжения усиливает растяжение в соответствующих местах преграды и приводит к разрушению (деламинации). Это явление и называют дроблением (spalling).<sup>2</sup>

Когда волна проходит через пластину с высоким импедансом, которая связана с пластиной с низким импедансом, волны растяжения излучаются от границы раздела. Это приводит к разрушению структуры, если пластина с высоким импедансом хрупкая. В обратном случае, если волна в начале проходит через пластину с низким импедансом, связанную с пластиной с высоким импедансом, тогда, очевидно, волны сжатия отражаются от границы раздела. Это может быть полезно, если мы хотим подавить разрушение в хрупком материале, например, в керамике.

Материал подложки должен выдерживать большие пластические деформации перед разрушением. Ударный импеданс  $Z$  материала определяется как

$$Z = \rho_0 U_s,$$

где  $\rho_0$  – плотность, а  $U_s$  – скорость ударной волны и весьма подобен упругому импедансу

$$Z = \rho C_0,$$

где  $C_0$  – “объемная” скорость звука в материале. Для случая, когда упругие волны распространяются с продольной скоростью звука, тогда используется  $C_l$ . Упругий импеданс будет равен

$$Z = \rho_0 C_l.$$

В процессе первой стадии проникания 0–9 мк/с трещины образуются вблизи границы раздела керамика–подложка из-за сдвиговых напряжений подложки и начинают расширяться по направлению движения ударника. Между 9 и 15 мк/с ударник деформируется, а керамика размельчается из-за множества трещин, которые пересекаются и объединяются. Приблизительно 40% массы ударника и его энергии тратятся на деструкцию. После 15 мк/с эрозия ударника прекращается и остальная энергия поглощается подложкой [10].

<sup>2</sup> См. выше.

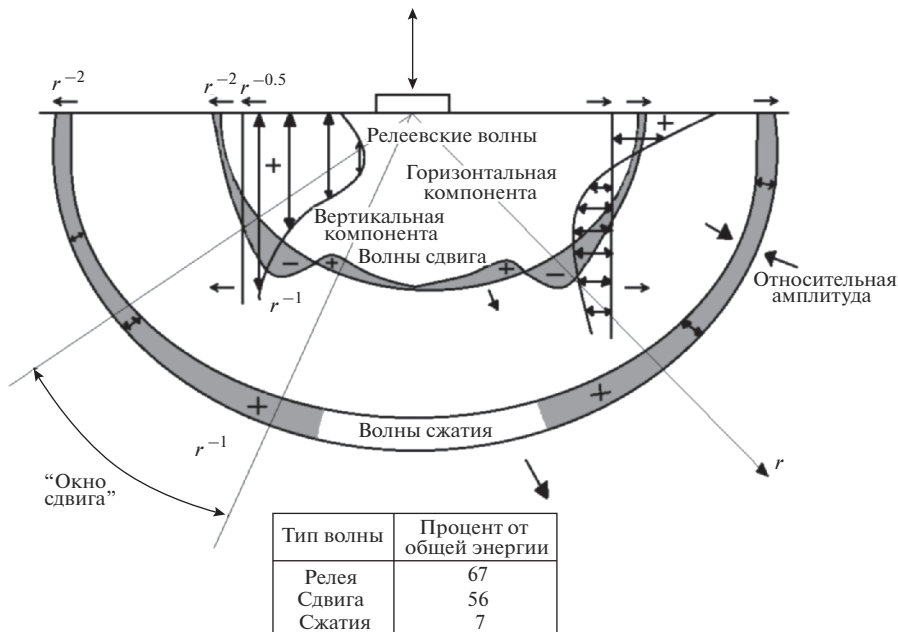


Рис. 1. Распределение упругих волн в твердом теле из [10].

Третий тип волн может существовать вблизи поверхности. Эти волны были исследованы Релеем [11], который показал, что их действие быстро уменьшается с глубиной и их скорость распространения меньше, чем объемных. Обычно, при некоторых допущениях скорость релеевской волны составляет

$$C_R = 0.9194C_t,$$

где  $C_t$  – скорость поперечных волн. В более общем виде можно записать

$$C_R/C_t = (0.87 - 1.12\nu)/(1 + \nu),$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Распределение энергии возбуждения звуковой волны при осевой нормальной нагрузке представлено на рис. 1 (при  $\nu = 0.6$ ) [12].

Вопрос о максимальной предельной скорости трещин многократно обсуждался и исследовался. Все эти работы можно разделить на четыре группы, в общем, отражающие четыре группы твердых тел.

Гриффитс считал, что рост трещин начинается со скоростью упругих волн.

Мотт получил следующее выражение максимально возможной скорости разрушения трещиной с начальной длиной  $l_0$  [13]:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2\pi E}{k\rho}} \left(1 - \frac{l_0}{l}\right)^{1/2},$$

где  $l$  – конечная длина трещины.

Коэффициент  $\sqrt{\frac{2\pi}{k}}$ , порядка 0.3 и при  $l \gg l_0$

$$v = 0.38 \frac{C_I}{\rho^2},$$

что очень напоминает параметр Ashby  $M$ .

Третья группа работ основана на предположении, согласно которому предельная скорость трещины лимитируется скоростью, при которой начинается процесс ветвления, составляющей примерно 0.6 от скорости поперечных

В последней группе максимальная скорость трещины отождествляется со скоростью распространения релеевских волн. Обзор этих работ детально представлен в [14]. Известно, что при приложении импульсной нагрузки рост трещин резко ускоряется. По оценкам [15]:

$$r = \sqrt{\rho C_t^{3/2}},$$

где  $r$  – радиус разрушения идеально хрупкого бесконечного тела, вызванного оссиметричным импульсом

$$\rho = 2\pi r_0 q \Delta t.$$

где  $r_0$  – радиус диаметра индентора,  $q$  и  $\Delta t$  – среднее значение энергии и времени взаимодействия индентора и преграды, причем, предполагается, что радиус разрушения  $r$  гораздо больше радиуса начального отверстия  $r_0$ .

На хрупком сколе всегда присутствуют многочисленные ступени и язычки, которые являются следствием скола на плоскости спайности, плоскости двойника, пересечением трещины с винтовыми дислокациями. Кроме того, подобные ступеньки могут возникать при пересечении трещиной границ субзерен и слабо разориентированных кристаллитов. Можно выдвинуть следующее определение: разрушение является хрупким, если для его протекания и завершения достаточно упругой энергии разрушаемого тела.

Трудно представить себе зарождение микротрещины в кристаллических материалах минуя этап пластической деформации. Если для зарождения трещины пластичность необходима, то при распространении трещины ее роль не очень существенна. Всегда можно представить себе вскрытие быстрой трещины вследствие упругого разрыва связей в устье трещины. Нагрузки там близки к теоретической прочности.

Разрушение может оставаться хрупким, если существует закритическая стадия лавинного квазиупругого роста трещин, когда высокая скорость ее распространения исключает возможность использования энергии удара и единственным источником упругой энергии для подпитывания трещины остается длительный распад поля напряжений самой преграды после удара [14].

Неупругая деформация приводит к следующим этапам разрушения, в зависимости от величины приложенного напряжения:

Осевое разрушение преграды из-за макроскопических трещин расширяющихся в направлении осевого сжатия; при отсутствии любого бокового нагружения.

Образование дефектов или макроскопического сдвигового разрушения.

Вязкое течение в условиях достаточно большого осевого сжатия.

Переход от хрупкого к вязкому разрушению наступает, когда микроскопическая деформация преграды становится более однородно распределенной в объеме [14].

Определим “вязкость” как

$$\Delta = K_c / \tau_y (\pi c)^{1/2},$$

где  $K_c$  – приблизительно равен коэффициенту Гриффитса и  $\tau_y$  – напряжение сдвига. Значение  $\Delta$  при комнатной температуре для вязких материалов, например сталей или алюминия, достаточно большое (3–4 для сталей и несколько больше для алюминия)

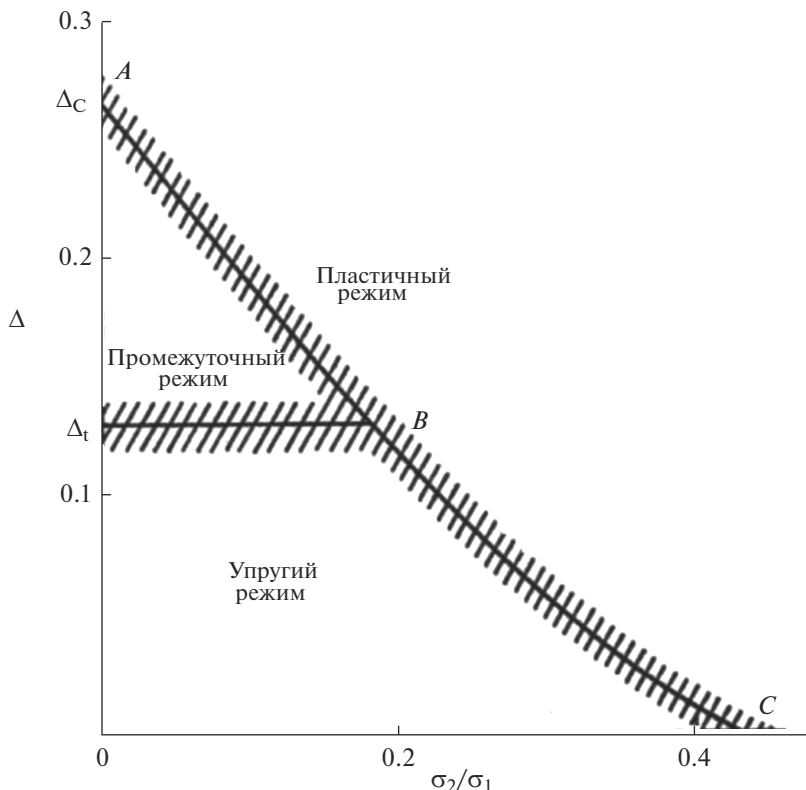


Рис. 2. Диаграмма перехода “хрупкое–вязкое” из [14].

при наличии микротрещин величиной порядка размера зерна). Для кристаллических тел с микротрещинками значение  $\Delta$  достаточно мало, порядка нескольких сотых. Эти материалы, таким образом, являются “хрупкими”, хотя их хрупкость или “вязкость” будут также зависеть от величин отношения нагружения  $Z_1$  к нагружению в устье трещины  $Z_2$  при этом  $l_0$  – длина трещины в начале роста,  $L$  – длина трещины, а характерный коэффициент  $l/l_0$  меньше единицы. На рис. 2 приведена диаграмма перехода хрупкое–вязкое из [16].

Точная модель должна содержать описание различных неупругих процессов для использования соответствующих законов и уравнений. Например, одноосная модель раскалывания и дефектообразования при различных ограничениях была рассмотрена в [17] и основала развитие микротрещин в плоскости деформация–напряжение. Однако при переходе в трехмерное пространство такой анализ весьма сложен.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В [14] представлена микромеханическая модель для высокодеформированной керамики, основанной на образовании невзаимодействующих микротрещин, однородно распределенных в объеме.

В общем, эти четыре основных представления можно представить как теоретическую основу для описания неупругого разрушения керамики.

В первом представлении материал представляется как упругий и напряжения рассчитываются на основе закона Гука.

Во втором оцениваются напряжения, которые стремятся к нулю, когда переменное в уравнении состояния достигает критического значения. Поведение керамики под нагрузкой может быть либо упругим, либо упруго-пластичным.

Третье представление рассматривает керамику как упруго-пластичную среду и использует условия и уравнения состояния такими же, как и для металлов.

Четвертое основано на статистическом описании числа трещин на единицу объема как функцию положения, размера трещины и ориентации относительно направления деформации.

Детальный обзор этих работ представлен в [17].

В совокупности с [16] эти представления, несмотря на их очевидную ограниченность (модельную), однозначно свидетельствует о том, что пластическое (т.е. нелинейная связь напряжения и деформации) поведение керамики является следствием хрупкого измельчения, и определяется разрывом межзатомных связей между частицами. Такая задача была поставлена и решена еще в [18].

Был рассмотрен длинный, тонкий недеформированный стержень (ударник) (плотность  $\rho_c$ , длина  $l$  и площадь  $S$ ), который движется вдоль своей оси со скоростью  $v_c$  и встречается с полубесконечным твердым телом (плотность  $\rho_n$ ). Взаимодействие происходит по нормали к поверхности, а вся механическая энергия стержня расходуется на диссоциацию (атомизацию) вещества ( $D$ ).

В [18] получено:

$$l_p = 0.25V_l\rho\sqrt{2D/M},$$

$$\epsilon_p = l_n \times 2/V_l\sqrt{2D/M},$$

$$W = \frac{1}{2\rho_c l S v_c^2} = DS l_n / V,$$

где  $W$  – механическая энергия стержня,  $l_n$  – глубина каверны, образовавшейся в веществе,  $V$  – объем одного моля вещества,  $M$  – г/моль вещества,  $V_l$  – продольная скорость звука.

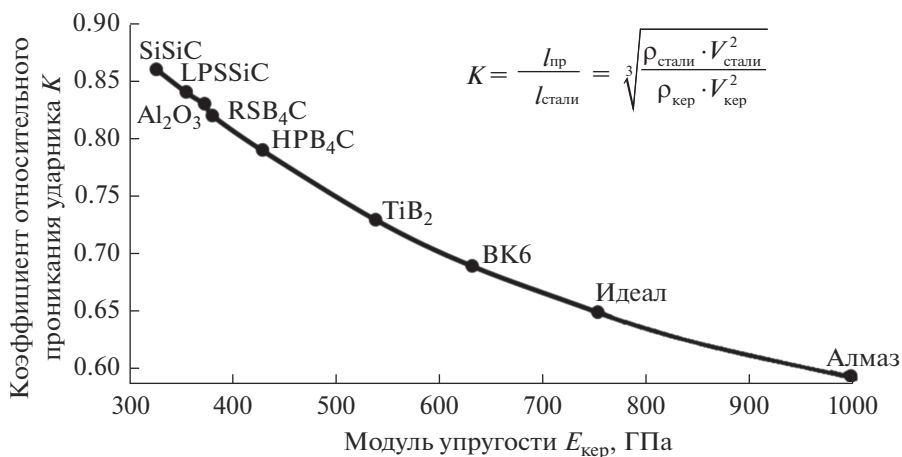


Рис. 3. Зависимость коэффициента относительного проникания стального ударника в керамику.



Таблица 2. Свойства керамических материалов

Материал	Плотность <sup>3</sup> $\rho_{\text{кер}}$ , кг/м <sup>3</sup>	Скорость звука $V_{\text{кер}}$ , м/с	Модуль упругости $E_{\text{кер}}$ , ГПа	$K = l_{\text{пр}}/l_{\text{стали}}$
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3750	9800	375	0.83
SiSiC	3100	10300	329	0.86
LPSSiC	3250	10500	358	0.84
RSB <sub>4</sub> C	2550	13000	383	0.82
HPB <sub>4</sub> C	2750	11800	431	0.79
ВК6	15000	6500	633	0.69
TiB <sub>2</sub>	4500	11000	540	0.73
Идеал	3350	15000	754	0.65
Алмаз	3510	17000	1000	0.59
Сталь	7810	5173	209	1.00

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – спеченный корунд; SiSiC – реакционно-спеченный карбид кремния; LPSSiC – жидкофазно-спеченный карбид кремния; RSB<sub>4</sub>C – реакционно-спеченный карбид бора; HPB<sub>4</sub>C – горячепрессованный карбид бора; ВК6 – сплав WC + 6% Co; TiB<sub>2</sub> – спеченный диборид титана; Идеал – материал алмаз–карбид кремния; Алмаз – монокристаллический алмаз.

Принимая во внимание, что относительная деформация  $\epsilon_p = l_n/l$ , получаем окончательную формулу уравнения

$$l_n = a l_c \sqrt[3]{\rho_c V_c^2 / \rho_n V_l^2},$$

где  $a = (\ln 2)^{2/3}$ ,  $\rho_c$  и  $\rho_n$  плотность стержня и керамики соответственно.

Анализ полученного выражения показывает, что при механическом динамическом нагружении энергия диссоциации и скорость звука являются факторами, определяющими диссоциацию энергию нагружения при высокоскоростном деформировании. Более того, используя эти фундаментальные константы можно построить ряд материалов по степени их сопротивления динамическому нагружению. На рис. 3 представлена кривая зависимости отношения относительного проникновения стали и ряда известных и используемых в практике керамических материалов (показаны в табл. 2).

Интересно, что появившийся в 1992 г. обзор работ в СССР по механике разрушения привел эту формулу и обсудил ее. Приведем две цитаты [19]: “Советские исследования механики проникания в керамике отражают более передовое мышление, чем западные исследования в связи с различием концептуальных подходов. Развитие концепции характеристических волн разрушения относятся (вероятно) к разрушению при растяжении и предшествуют образованию кратера ... Советские экспериментальные данные подтверждают эту гипотезу”.<sup>3</sup> И еще одно важное цитирование [19]:

“Советские публикации аналитических и экспериментальных работ опередили Запад на несколько лет”.<sup>4</sup>

В заключении приводим фотографию каверны разрушения керамики “Идеал” (рис. 4) при воздействии индентора диаметром 12.7 мм со скоростью 840 м/с. Отчетли-

<sup>3</sup> Конец цитаты.

<sup>4</sup> Конец цитаты.



**Рис. 4.** Разрушение керамики “Идеал”.

во видны круговые и радиальные трещины. Любопытно, что от общего объема преграды объем каверны составляет около 20%, что хорошо соответствует [2].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ashby M.F., Cebon D.* Materials selection in mechanical design // *Le Journal de Physique IV*. 1993. V. 3. № C7. P. 1–9.

2. *Crouch J.G.* Introduction to armor materials // *The Science of Armor Materials*. 2017. V. 1. P. 33.
3. *Kocer C.* Using the Hericah fracture system to measure crack growth data; review // *International Journal of Fracture*. 2003. V. 121. № 3. P. 111–132.
4. *Шевченко В.Я.* Введение в техническую керамику. М.: Наука, 1993. 114 с.
5. *Brandon D.G.* Armor. Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials // Pergamon. 1991. P. 22–25.
6. *Hazell P.J.* Armor, Materials, Theory, Design, CRC Press. 2016. P. 231.
7. *McCaughey 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. Willey and Sons, Inc.
8. *Woodward R.* A simple one-dimension approach to modeling ceramic composite armor defeat // *Int. J. Impact. Engng.* 1990. V. 9. № 4. P. 455.
9. *Rhee Y.W., Kim H.-W., Deng Y., Lawn B.R.* Brittle fracture versus quasi plasticity in ceramics: a simple predictive index // *J. Amer. Ceram. Soc.* 2001. V. 84. P. 561–565.
10. *Wilkins M.L., Cline C.F., Honodel C.F.* Fourth progress report of light armor program. – California Univ., Livermore. Lawrence Radiation Lab. 1969. № UCRL-50694.
11. *Raileigh W.S.* On waves propagation along the plate surface of an elastic solid // *Proc. London Math. Soc.* 1887. V. 17. P. 4–11.
12. *Woods R.D.* Screening of surface waves in solids // *J. Soil. Mech. Founds div. Am. Soc. Civ. Engns.* 1968. V. 94. P. 951–980.
13. *Mott N.F.* A theory of the origin of fatigue cracks // *Acta Metallurgica*. 1958. V. 6. № 3. P. 195–197.
14. *Финкель В.М.* Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах. М.: Металлургия, 1970. 376 с.
15. *Черепанов Г.П.* О влиянии импульсов на развитие начальных трещин // *Журн. ПМТФ*. 1963. № 1. С. 97–103.
16. *Horii H., Nemat-Nasser S.* Brittle failure in composition splitting, fanling and brittle – ductile transition // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1986. A319. P. 337–374.
17. *Rajendran A.M.* Historical perspective on ceramic materials damage models/ *Ceramic armor materials by design*. Published by the American Ceramic Society, Ceramic Translations. 2001. V. 134. P. 281–308.
18. *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.
19. *Isbell W.M., Anderson C.E., Asay J.R., Bless S.J., Grady D.E.* Penetration Mechanics Research in the Former Soviet Union. – SCIENCE APPLICATIONS INTERNATIONAL CORP SAN DIEGO CA. 1992.