

РОЛЬ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫХ СИЛ МАТЕРИАЛОВ В ИХ РАЗРУШЕНИИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

И.Ю. Пашкеев

В работе показана связь величины энергии атомизации металлов, оксидов, карбидов, нитридов и материалов на их основе с разрушением при высокоскоростном ударе.

На протяжении многих лет традиционно разрабатывался макроскопический подход в оценке механических свойств материалов. В технической механике для решения прикладных задач статики и невысоких скоростей нагружения оказывается достаточно известных параметров и модулей, характеризующих прочностные и пластические свойства материала. Однако поведение материалов при импульсных нагрузках (в ближней зоне взрыва) и высокоскоростном ударе плохо поддается прогнозированию по величине модуля Юнга, предельной прочности материала, ударной вязкости, пластичности и т.д. Иллюстрацией существования различного механизма разрушения при разных скоростях удара могут служить экспериментальные результаты работы [1], подтверждающие наличие пороговой скорости нагружения, по достижении которой наблюдалось значительное увеличение объема разрушения у металлов, рис. 1. Точнее, следует говорить о количестве подведенной энергии, так как при изменении материала снаряда несколько изменяется и пороговая скорость удара, но суть явления остается неизменной.

По результатам цитируемой работы следует, что после удара стальным ударником со скоростью более 3 км/с по преграде металлы переходят в такое пластичное состояние, при котором их поведение описывается уравнением гидродинамики, полученным М.А. Лаврентьевым для кумулятивных зарядов:

$$L = l \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_n}}, \quad (1)$$

где L – глубина проникания; l – длина кумулятивной струи при отсутствии преграды; ρ_c и ρ_n – плотность материала снаряда и преграды соответственно.

В соответствии с формулой (1) объем разрушения свинца не должен быть больше, чем у металлов с меньшей плотностью, но экспериментальные результаты говорят об обратном. Такое же несоответствие наблюдается для кадмия и меди. Этот факт объясняют тем, что объем кратера растет за счет вытеснения материала в радиальном направлении, и его объем увеличивается для пластичных материалов тем больше, чем меньше энергии требуется для пластического течения материала преграды [2]. Тогда как объяснить поведение пластичных материалов свинца, алюминия и кадмия с этих позиций? Кстати,

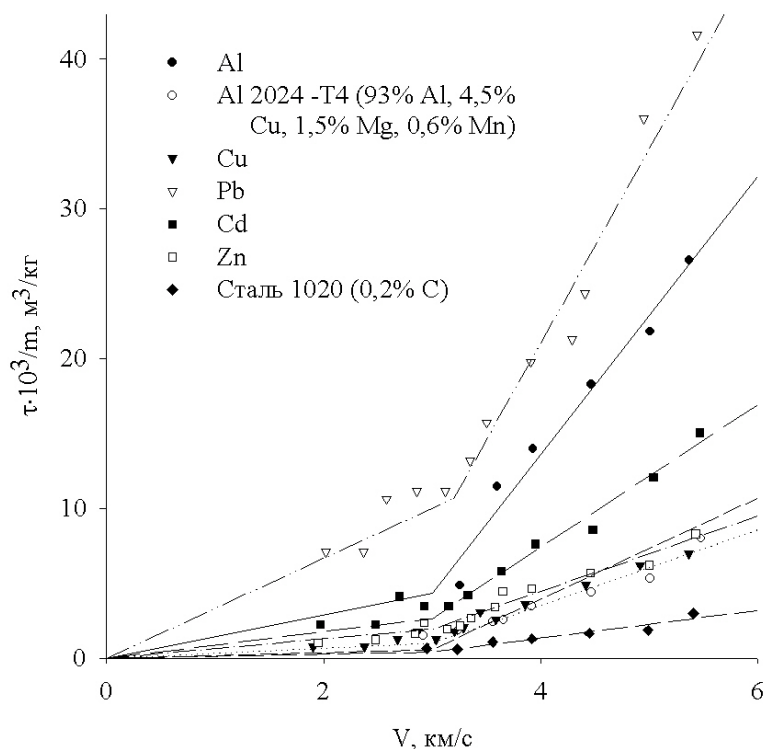


Рис. 1. Зависимость отношения объема кратера к массе снаряда от скорости стального снаряда для преград из различных металлов [1]

автор работы [2] приводит экспериментальные данные, из которых следует, что глубина образовавшегося кратера в свинце в результате воздействия стандартного кумулятивного заряда больше, чем в мягкой стали в 1,3 раза.

Прогнозирование разрушения материалов при высокоскоростном ударе с позиций чистой гидродинамики разработано М.А. Лаврентьевым. Однако накопленный экспериментальный материал указывает на значительные расхождения между теорией и практикой, которые нельзя отнести на разброс результатов из-за нестабильности кумулятивных зарядов. Наши экспериментальные результаты, полученные с прецизионными зарядами, подтвердили представления о более сложном механизме разрушения, чем это представляется в физике быстро протекающих процессов, исходя только из гидродинамической теории.

Попытка связать поведение материала с его субмикроскопическими параметрами сталкиваются с трудностями, которые усугубляются отсутствием надежных экспериментальных данных и теоретических обобщений о влиянии микроскопических свойств на макроскопические. В конечном счете, реакция образца или конструкции определяется приложенными нагрузками. Устанавливая зависимость глубины проникания бронебойных снарядов от их скорости, Свифт Х.Ф. [3] обнаружил, что при скоростях удара более 3 км/с рост глубины проникания практически прекращается, рис. 2. Таким образом, на основании экспериментальных результатов можно констатировать, что по достижении скорости удара порядка 3 км/с металлы в зоне удара переходят в квазиджидкое состояние. Эта особенность высокоскоростного разрушения определяет и выбор способа прогнозирования разрушения материалов.

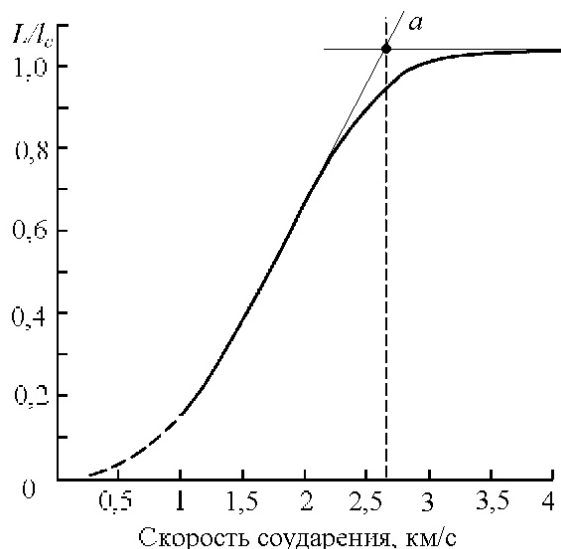


Рис. 2. Глубина проникания пробойника в преграду, отнесенная к его длине, в зависимости от скорости соударения стальных пробойников со стальными мишенями

Предложено уравнение, в котором разрушение материала связывается с константой деформационной прочности S_n

$$\frac{L}{d} = 1,50 \left(\frac{\rho_c}{\rho_n} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho_c V^2}{2S_n} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

здесь обозначения те же, что и в (1)–(3).

Поскольку S_n неизвестно, то ее предлагается находить экспериментально, а затем после подстановки в уравнение (4) последнее можно применять для предсказания разрушения этого же металла, но при других условиях нагружения. Предложены также уравнения для описания кратерообразования по величине твердости материала преграды [1, 4–6]:

Для аппроксимации разрушений предложены эмпирические уравнения, в которые входят прочностные и физические характеристики металла преграды, а также скорость ударника, его геометрическая конфигурация и угол встречи с преградой [1, 4]:

$$\frac{L}{d} = \left[\frac{12 \cdot 10^{-9} \left(\frac{E_k}{HB} \right) \cos^2 \theta}{2\pi d} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

$$\frac{L}{d} = 2,28 \left(\frac{\rho_c}{\rho_n} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{V \cos \theta}{C} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

где L – глубина кратера; d – диаметр ударника; θ – угол соударения ударника с преградой; HB – твердость по Бринеллю; V – скорость ударника; ρ_c и ρ_n – плотность ударника и преграды соответственно; C – скорость звука в преграде; E_k – кинетическая энергия ударника.

$$L = 1,2 \left(\frac{\rho_c}{\rho_n} \right)^{\frac{2}{3}} r \cdot \ln \left(1 + \frac{\rho_c^{\frac{2}{3}} \rho_n^{\frac{1}{3}} V^2}{HB} \right); \quad (5)$$

$$\frac{E_k}{\tau} = 2,6 \cdot 10^8 \text{ HB}; \quad (6)$$

$$V_{кр} = 0,1 \left(\frac{\rho_c}{\rho_n} \right)^{1/6} \left(\frac{E_k}{B_{max}} \right), \quad (7)$$

где r – радиус сферического ударника; τ – удельный объем кратера, то есть приходящийся на единицу массы ударника; $V_{кр}$ – объем кратера; B_{max} – максимальная твердость преграды (определяется после испытаний материала на не разрушенной части в непосредственной близости к кратеру). Остальные обозначения те же, что и для (1)–(4).

Уравнения (2) и (5)–(7), включающие величину HB, не могут быть использованы для предсказания разрушения материала при высокоскоростном ударе по двум причинам. Во-первых, HB зависит от структуры материала и меняется с изменением температуры, а истинная температура в точке удара неизвестна. Во-вторых, замер твердости по Бринеллю дает надежные результаты до значения 450 единиц, так как при более высокой твердости материала начинает деформироваться индентор прибора. Материалы с более высокой твердостью испытываются по иным методикам (по Роквеллу и по Викерсу). Перевод в расчетные единицы по Бринеллю сопровождаются значительными ошибками из-за принципиального различия в единицах твердости [7].

Работы А. Макмиллана [8], Изотова А.Я. и Лазарева В.Б. [9] дают представление о возможности расчета прочности тел на основе моделей их строения. В работе [9] разрушение керамики рассматривается как разрыв межатомных связей и обосновывается вывод о том, что более высокой стойкостью к разрушению обладают материалы, которые обладают максимальными значениями динамической сжимаемостью (ρC^2) и энергии диссоциации (ΔH_D). Предложена следующая формула для определения глубины кратера:

$$l_k = b^{2/3} l_c \sqrt[3]{2 \rho_c V_c^2 / (n_b \rho_n V_l^2)}, \quad (8)$$

где b – коэффициент (0,693...2); l_c – длина недеформируемого стержня (кумулятивной струи); ρ_c и ρ_n – плотности снаряда и преграды соответственно; V_c – скорость снаряда; V_l – скорость распространения продольных волн в преграде; n_b – среднее число межатомных связей, приходящихся на 1 атом. Прогнозирование разрушения хрупких материалов – стекла, керамики, карбидов, нитридов и материалов на их основе делается по прочностным характеристикам так же, как и для металлов, хотя их строение принципиально отличается от строения металлов.

Из неполного обзора методов и результатов исследований по прогнозированию и описанию объема разрушения материалов следует, что разрушение материала зависит от его атомного и молекулярного строения, но только в работах [9, 10] приводятся результаты прогнозирования разрушения, на основе сравнения кинетической энергии удара с энергией разрыва межатомных и молекулярных связей вещества. Модуль Юнга, сопротивление материала сжатию и растяжению, пластичность, ударная вязкость, коэффициент Пуассона, динамическая прочность, акустическая жесткость и другие физико-механические параметры материалов являются лишь некоторым внешним проявлением при определенных условиях внутреннего строения материала, которые теряют свой физический смысл для скачкообразного перехода материала в пластичное состояние, в условиях высокоскоростного удара. Большое количество эмпирических уравнений для прогнозирования разрушения по физико-механическим свойствам материалов следует рассматривать как отсутствие четких представлений на разрушение при высокоскоростном ударе. В настоящее время основные положения высокоскоростного удара сформулированы, и разрушение материала при переходе в жидкое состояние должно рассматриваться с учетом физико-химических свойств жидкой фазы. Например, в работе [11] указывается, что «невозможно предсказать поведение материала при высокоскоростных испытаниях на основе свойств, определенных в статических условиях, то есть должен быть иной подход».

Любое разрушение следует рассматривать как разрыв атомных связей в кристаллической решетке вещества. При высокоскоростном ударе разрушение материала происходит локально, без деформации всего объема преграды. Поскольку время приложения нагрузки мало, то рассеиванием подведенной энергии за счет теплопередачи в объем материала или окружающую среду можно пренебречь, и считать, что подведенная в точку контакта соударяющихся тел энергия расходуется только на разрушение и деформацию, объем которой падает по отношению к объему разрушения с ростом подводимой кинетической энергии. Вид подведенной к материалам энергии (тепловая или кинетическая или их комбинация) не имеет значения, так как разрушение кристаллической решетки происходит в любом случае по достижении необходимого для этого значения. В работах Р. Эйчельбергера, Дж. Кайнике [1] и Р. Понда, К. Гласса [5] приведены экспериментальные подтверждения этому. С повышением температуры материала преграды или, иными словами, с ростом сообщенной предварительно тепловой энергии, уменьшается скорость удара для образования кратера при разрушении преграды, т.е. уменьшается доля подведенной кинетической энергии от общего количества энергии, необходимого для разрушения. Таким образом, разрушение материала преграды произойдет в том случае, когда сообщенная путем удара энергия E_k будет больше энергии атомизации кристаллической решетки E_p . Поскольку разрушение материала происходит в некотором объеме, то следует сравнивать удельную энергию атомизации кристаллической решетки материала с удельным объемом разрушения или пропорциональным ему параметром. Под удельным объемом разрушения принят объем кратера, отнесенный к единице массы ударника тела [1]. Для чистых материалов энергия атомизации кристаллической решетки является справочной физико-химической характеристикой материала, которая имеет размерность Дж/моль. Пересчет в удельную осуществляется следующим образом:

$$E^* = \frac{E \cdot \rho}{A}, \quad (9)$$

где E – энергия, отнесенная к одному грамм-атому (грамм-молю) чистого материала (металл, оксид) или раствора; ρ – плотность материала, A – атомная или молекулярная масса материала. Параметр материала E^* одновременно отражает межатомное или молекулярное сцепление и плотность материала преграды, которая является основным критерием оценки прочности по гидродинамической теории. Плотность сложных оксидных или металлических жидких фаз (расплавов) может быть рассчитана как аддитивная функция состава. Энергия атомизации вещества равна энергии образования раствора или чистого вещества из атомов, но с противоположным знаком. Для сталей, сплавов, керамики, стекла энергия образования жидкой фазы может быть определена, например, по теории регулярных растворов. Энергия произвольного количества металлического раствора определяется из уравнения:

$$E = \sum_{i=1}^k x_i E_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k x_i x_j Q_{ij}. \quad (10)$$

Здесь x_i, x_j – атомные доли компонентов раствора; Q_{ij} – энергия взаимообмена компонентов раствора; E_i – энергия атомизации решетки чистого компонента. Энергетический параметр Q_{ij} отражает энергии взаимообмена (перестановочную энергию), т.е. прочность связей компонентов i и j в растворе.

На рис. 3 представлена зависимость объема разрушения по данным работы [1] от удельной энергии атомизации материала преграды. Для чистых металлов – это справочная величина, а для алюминиевого сплава Al 2024–T4 рассчитана нами. Для расчета энергии образования расплава Al 2024T4 из простых элементов подставлялись в уравнение (10) значения $Q_{Al-Cu} = 63,46$ кДж/моль, $Q_{Al-Mg} = 121,1$ кДж/моль, $Q_{Al-Mn} = 472,1$ кДж/моль, $Q_{Al-Zn} = 29,4$ кДж/моль и атомные доли компонентов в соответствии с химическим анализом сплава (93 % Al; 4,5 % Cu; 1,5 % Mg; 0,6 % Mn). Значения перестановочной энергии для многих компонентов определены с достаточной для количественных расчетов точностью и представляют базу данных термодинамики растворов.

Следует критически относиться к данным по объему разрушения преград из алюминия и магния или их сплавов, так как эти металлы легко переходят в жидкое состояние и дополнительно окисляются на воздухе. Если этот факт учесть в результатах эксперимента Р. Эйчельбергера, то точка, соответствующая объему разрушения алюминия, отклоняется от общей зависимости не более, чем для других металлов. Разрушение металлов при высокоскоростном ударе, представленное на рис. 3, в общем виде можно описать дробно-линейной функцией:

$$y = \frac{1}{a + bE^*} \quad (11)$$

где y – величина, характеризующая разрушение металла; E^* – удельная энергия атомизации кристаллической решетки металла; a и b – константы, определяемые по экспериментальным результатам.

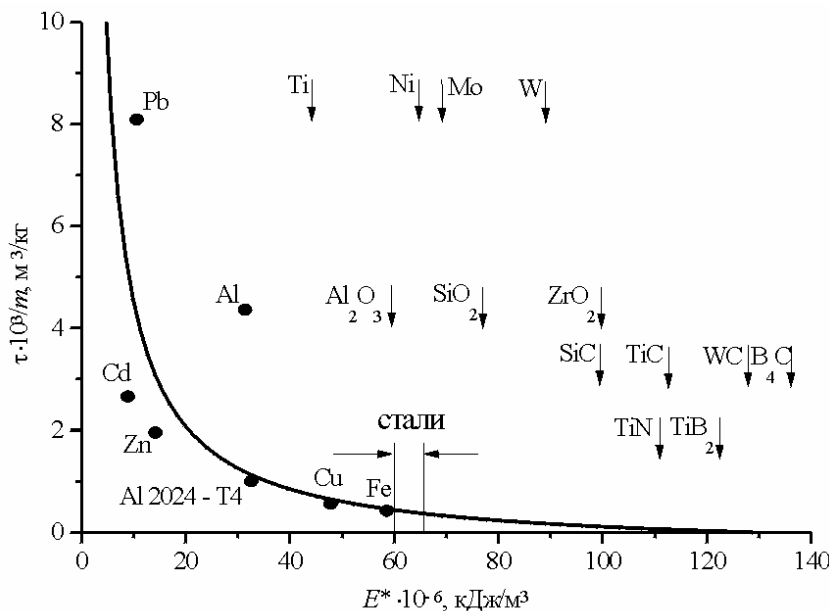


Рис. 3. Зависимость объема разрушения от энергии атомизации материала преграды по данным работы [1] и уравнению (10). Стрелками обозначены прогнозируемые объемы разрушения металлов оксидов, карбидов, нитрида титана и боридов титана соответственно их значениям E^* и область разрушения сталей

Известное у прочнистов представление о несоответствии якобы завышенного объема разрушения при высокоскоростном ударе и механических свойств легированных сталей, обладающих высокой прочностью, ударной вязкостью, износостойкостью и сопротивлением смятию в сравнении с рядовыми сталями, является закономерным при сравнении энергий атомизаций сталей. Они мало отличаются от энергии атомизации железа и обычных конструкционных сталей. Этот факт лишний раз подтверждает, что поведение материалов при высокоскоростном ударе определяется, прежде всего, межатомным взаимодействием в металлах, а не механическими характеристиками, которые являются некоторым отражением внутреннего строения.

Установленное соответствие позволяет по расчетным значениям энергии атомизации сплавов, сталей, оксидов, карбидов, нитридов и боридов выбрать оптимальный состав ударопрочных композиционных материалов.

Энергии атомизации металлов и соединений представлены на рис. 4, 5 в виде столбчатых диаграмм. Высокой энергией атомизации обладает WC, который, в сочетании с наибольшей плотностью из всех конструкционных материалов, нашел применение в производстве пробойников различного типа. Известны также уникальные режущие свойства твердых сплавов на основе WC. Однако, как это следует из представленных значений энергии атомизации соединений и металлов, можно создать безвольфрамовый ударопрочный материал из карбидов, нитридов и боридов на металлическом связующем. На рис. 3, в дополнение к имеющимся данным об удельном объеме разрушения и энергии атомизации Pb, Cd, Zn, Al, Al2024-T4, Cu, Fe, нанесены значения энергии атомизации ряда металлов и соединений, из которых можно обоснованно выбрать компоненты для производства композиционных ударопрочных материалов.

Ранее [12] с этих же теоретических позиций автором была получена зависимость скорости распространения трещин в стекле при взрывном нагружении от удельной энтальпии образования стекла из простых веществ по экспериментальным результатам, приведенным в работе Х. Шардина [13]

$$V_f = -45360 - 2346(\Delta H) - 28,956(\Delta H^2), \quad (12)$$

где V_f – скорость распространения трещин; ΔH – удельная энтальпия образования стекла из простых веществ.

Таким образом, энергия атомизации материалов является универсальной термодинамической характеристикой, которая определяет разрушение материалов при высокоскоростном ударе.

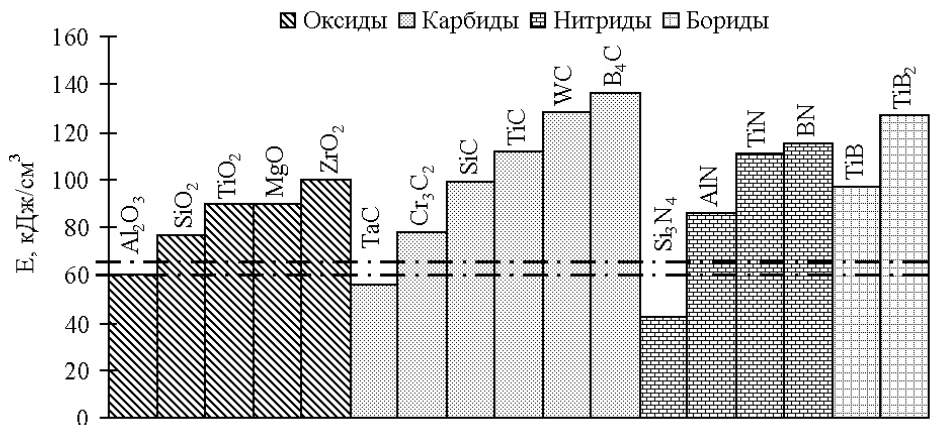


Рис. 4. Энергии атомизации соединений. Пунктиром обозначены границы энергии атомизации сталей

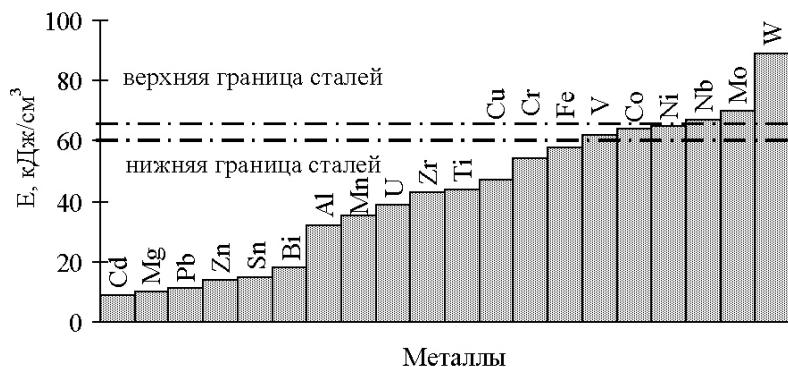


Рис. 5. Энергии атомизации металлов

Полученные обобщения позволяют также сделать вывод о том, что из сталей и сплавов с одинаковыми механическими свойствами для защиты от высокоскоростных ударов предпочтительнее применять материалы с наибольшей энергией атомизации.

Для проверки рабочей гипотезы на образцах композиционных материалов были изготовлены литые блоки с композиционной сердцевиной толщиной 50 мм. Образец для испытаний представлял собой куб с длиной ребра 200 мм и массой около 60 кг, который устанавливали на пакет из стальных плит. Заряд ВВ устанавливали над образцом, как показано на схеме испытаний (рис. 6). Такое проведение испытаний позволяло определять глубину пробоя без разрезки образцов, так как по методике эксперимента применялся заряд, который обеспечивал сквозной пробой блока и части стальных плит. Полная глубина пробоя определялась следующим образом:

$$l_{\text{общ}} = l_{\text{образца}} + l_{\text{плит}} \tag{13}$$

Коэффициент эквивалентности композиционного материала по отношению к литому материалу определяется по формуле

$$\eta = \frac{l_{\text{кер}}}{l_{\text{мет}} - (l_{\text{общ}} - l_{\text{кер}})}, \tag{14}$$

где $l_{\text{мет}}$ – глубина пробоя по чистому эквиваленту (катаный лист или литая сталь); $l_{\text{общ}}$ – общая глубина пробоя композиционного материала и металлического слоя; $l_{\text{кер}}$ – толщина композиционного материала или керамики в конструкции (в литом блоке).

Этот коэффициент определяет толщину металлокерамики или керамики, равноценную по своей противоккумулятивной стойкости единице толщины металлического эквивалента (этало-на). Для оценки результатов испытаний нами предложен графический метод определения изменения скорости кумулятивной струи в комбинированных преградах с различными прослойками. В основу метода положены два известных свойства кумулятивной струи: линейное распределение скорости по длине струи и наличие критической скорости пробивания преграды

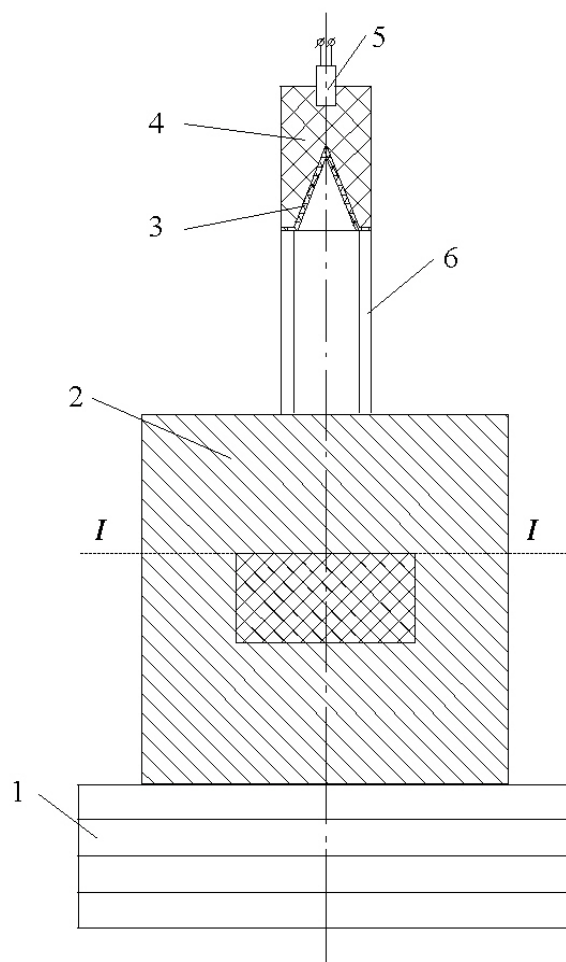


Рис. 6. Схема испытаний литых блоков с композиционной сердцевинной кумулятивными зарядами: 1 – стальные плиты; 2 – литой блок с композиционной сердцевиной; 3 – медный конус; 4 – Заряд ВВ; 5 – детонатор; 6 – картонная труба; I – I – сечение порезки блоков после испытаний

позиционного материала с добавкой V_4C – точка F . Из точки, соответствующей глубине пробоя, например, т. C для песчано-глинистой вставки, проводится линия параллельная линии AB , которая соответствует скорости кумулятивной струи в литой стали после пробоя вставки. При пересечении со второй границей вставки получаем скорость кумулятивной струи после пробоя вставки, точка D . Соединив точку M с точкой D получаем линию MD , которая показывает изменение скорости кумулятивной струи в песчано-глинистой вставке, а ломаная $AMDC$ – изменение скорости кумулятивной струи в комбинированной преграде. Для металлокерамических вставок с добавлением в композиционный материал карбида кремния изменение скорости кумулятивной струи определяется линией MK , а для композиционного материала с добавкой карбида бора – линией ME . Изменение скорости кумулятивной струи на единицу толщины вставки запишется следующим образом:

$$\delta u = \frac{dV_c}{dl} . \quad (15)$$

Изменение скорости кумулятивной струи при пробое монолитного блока на участке, где для других образцов находится вставка, определяется из треугольника MNN' :

$$\delta u = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta V_c}{\Delta l} . \quad (16)$$

Таким образом, определив $\operatorname{tg} \alpha$ для эталона и сравнивая его значение со значением $\operatorname{tg} \alpha_i$ или δu_i для других материалов, определяется коэффициент эквивалентности материала вставки.

[14]. По нашим исследованиям для литой стали после нормализации, закалки и высокого отпуска критическая скорость пробивания равна 2050 м/с. По данным работы [14] для сталей различной твердости критическая скорость пробивания кумулятивной струей лежит в пределах 2050–2200 м/с. На рис. 7 представлены изменения скорости кумулятивной струи V_c при прохождении через литую сталь или комбинированную преграду типа «сталь – металлокерамика – сталь» и соответствующие глубины пробоя l . Линия AB соответствует изменениям скорости кумулятивной струи в литой стали от начальной скорости $V_{нач} = 7200$ м/с до скорости останова $u_{кр} = 2050$ м/с с глубиной пробоя, которой соответствует точка B на линии $V = 2050$ м/с. Далее в этой же системе координат наносят глубины пробоя блоков с композиционной или керамической сердцевиной. На график наносятся координаты границ вставки, которые пересекаются с линией AB в точках M и N . Скорость кумулятивной струи в точке M для всех испытанных блоков одинаковая, так как толщина литого металла до вставки во всех блоках постоянная. Линия AM отражает изменение скорости кумулятивной струи в литой части блока до границ раздела металл – вставка.

По результатам испытаний откладываются значения глубины пробоя для блоков с различными вставками. Для песчано-глинистой вставки – это точка C на графике, для вставки из композиционного материала с добавкой SiC – точка L , для вставки из композиционного материала с добавкой V_4C – точка F .

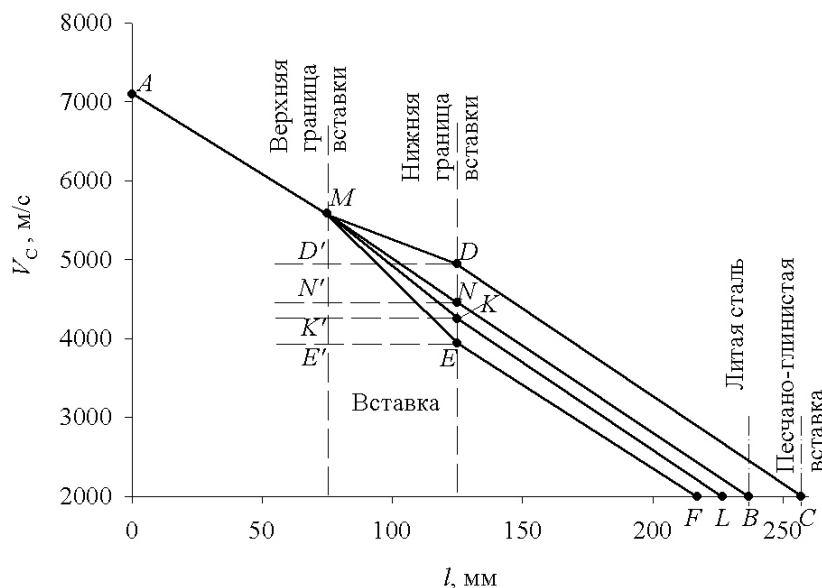


Рис. 7. Графический метод определения глубины пробоя комбинированной преграды кумулятивной струей

Этот графоаналитический метод позволяет оценить изменение скорости кумулятивной струи в сложной комбинированной преграде, состоящей из нескольких вставок различных материалов, и рассчитать глубину пробоя в комбинированной преграде.

Из приведенных результатов сравнительных испытаний композиционных материалов следует, что стойкость преграды высокоскоростному удару возрастает при введении в нее компонентов с более высокой энергией атомизации.

Литература

1. Эйчельбергер Р., Кайнике Дж. Высокоскоростной удар// В кн.: Физика быстропротекающих процессов. – М.: Мир, 1971. – Т. 2. – С. 204–246.
2. Шаль Р. Физика детонации// В кн.: Физика быстропротекающих процессов. – М.: Мир, 1971. – Т. 2. – С. 276–349.
3. Хэллок Ф. Свифт. Механика соударения со сверхвысокими скоростями// В кн.: Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – С.173–197.
4. Геринг Дж. Высокоскоростной удар с инженерной точки зрения // В кн.: Высокоскоростные ударные явления – М.: Мир, 1973. – С. 468–516.
5. Понд Р., Гласс К. Металлофизические исследования и распределение энергии// В кн.: Высокоскоростные ударные явления. – М.: Мир, 1973. – С. 428–467.
6. Christman D.R., Gehring J.W. Analysis of High-velocity projectile penetration mechanics// J. Appl. Physics. – 1966. – V. 37. – № 4. – P. 1579–1587.
7. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 232 с.
8. Макмиллан Н. Идеальная прочность твердых тел// В кн.: Атомистика разрушения. – М.: Мир, 1987. – С. 35–103.
9. Изотов А.Д., Лазарев В.Б. Теоретическая прочность керамических материалов// Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – Т. 21. – № 5. – 1985. – С. 706–711.
10. Друкованный М.Ф., Комир В.М., Мячина Н.И. Петряшина Л.Ф. Исследование взаимосвязи энергетических характеристик горных пород с их дробимостью// Взрывное дело: Сборник 67/24. – М.: Недра, 1969. – С. 29–37.
11. Кинеловский С.А., Тришин Ю.А. Физические аспекты кумуляции// Физика горения и взрыва. – 1980. – № 5. – С. 26–40.
12. Пашкеев И.Ю. Прогнозирование разрушения при высокоскоростном ударе и импульсном нагружении по термодинамическим характеристикам преграды// V Забалахинские научные чтения: Сб. трудов. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 1999. – С. 77–83.
13. Шардин Х. Исследование скорости разрушения// Атомный механизм разрушения; Пер. с англ. – М.: Металлургиздат, 1963. – С. 297–330.
14. Физика взрыва/ Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др.; Под ред. К.П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. – 704 с.

Поступила в редакцию 2 ноября 2005 г.