

О.Ю. Вшивков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СО СЛОЖНООРГАНИЗОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ НАГРУЗКАХ

Выявлены особенности поведения пакетов из композиционных материалов в условиях ударно-волнового нагружения, установлены корреляционные соотношения, связывающие параметры макроразрушения с динамическими прочностными характеристиками материалов, определены параметры проникания в них поражающих ударных фрагментов, пробития и откольного разрушения. Установлены значения характеристик соединения пористо-волокнутого металлического материала и керамического материала на основе карбосилицида титана для их успешного применения в качестве защитных элементов в преградах и конструкциях.

Ключевые слова: карбосилицид титана, композиционный материал, пористо-волокнустый металлический материал, удельный механический импульс, откол, противоударная стойкость, импеданс материала.

Введение

Процессы деформирования твердых тел при их высокоскоростном соударении, разрушения и фрагментации конструкций, испытывающих ударные и взрывные нагрузки, разрушения оболочек из новых конструкционных материалов в условиях интенсивного импульсного воздействия представляют значительный научный и технический интерес.

Сегодня резервы повышения противоударной стойкости традиционных металлических высокопрочных гомогенных материалов и различных сплавов для их использования в качестве эффективных средств защиты против высокоскоростных ударников из высокоплотных материалов считаются исчерпанными. В условиях повышенных термосиловых воздействий, которые реализуются в зоне контакта с преградой, по мере увеличения скорости ударных фрагментов прочностные свойства металлических материалов преград резко снижаются, они подвергаются интенсивным пластическим деформациям и быстро срабатываются, а конструкции из них не выполняют основные защитные функции.

Решить задачу повышения защиты объектов от повреждений при высокоэнергетическом ударно-волновом воздействии могут пакеты на основе композиционных материалов и конструкций со сложной внутренней структурой, стойкие к удару, в том числе на основе керамики, металлокерамики, металлокомпозитов, пористых и функционально градиентных материалов.

В рамках этой задачи исследовались бронезащитные свойства слоистых пакетов, состоящих из композиционного материала (КМ) на основе карбосилицида титана Ti_3SiC_2 и пористо-волокнистого металлического материала (ПВММ) из волокон сплава X20H80. Тугоплавкий композиционный материал на основе Ti_3SiC_2 имеет высокие механические характеристики при температурах до $1200\text{ }^\circ\text{C}$. Карбосилицид титана благодаря особой кристаллической структуре, представляющей собой слои карбида титана $[Ti_3C_2]$, разделённые слоями атомов кремния, способен сдерживать распространение микротрещин, сочетает высокую вязкость разрушения ($10\text{--}12\text{ МПа/м}^{1/2}$) с высокой прочностью как при комнатной, так и при повышенных температурах, имеет небольшое количество примесей (до 2,7 %), обладает высокой стойкостью к окислению до температуры $1000\text{--}1100\text{ }^\circ\text{C}$.

При создании пакетов бронезащиты и шумогашения необходимо определить оптимальный способ соединения ПВММ и КМ на основе карбосилицида титана, а также определить массово-кинематические параметры откольного слоя по заданным условиям нагрузки и параметрам преграды.

Для получения более стойкого к удару материала необходимо создать слоистую конструкцию, в которой ПВММ будет частично гасить кинетическую энергию за счёт деформации и разрушения волокон и выполнять функцию шумогашения, а составляющая из КМ будет останавливать летящие фрагменты и осколки. Достичь более высоких механических характеристик КМ, армированных протяжёнными волокнами, можно лишь в том случае, если сохранить характеристики волокон при консолидации компонентов КМ.

1. Общий механизм разрушения и пробития бронезащитных пакетов

Наиболее простая модель пробивания преграды или защитного пакета может быть построена на балансе кинетической энергии E_k поражающего элемента (ПЭ) и работы $A_{\text{деф}}$ деформации и разрушения

пакета. При пробивании преграды общая кинетическая энергия E_k в основном идет на пластическую деформацию среды $A_{\text{деф}}$ и обеспечение запреградной скорости фрагмента двигателя $E_{\text{пр}}$. В рамках этой модели определяется запас прочности по непробиваемости преграды:

$$K_E = \frac{A_{\text{деф}}}{E_k} > 1. \quad (1)$$

Кинетическая энергия определяется через массу m и скорость V ударника:

$$E_k = \frac{mV^2}{2}. \quad (2)$$

Кинетическая энергия E_k расходуется на преодоление сил сопротивления преграды, деформацию и разрушение ударника, нагревание преграды и ударника, а также на сообщение ударнику запреградной кинетической энергии при пробивании тонких преград. Наибольшая часть энергии расходуется на преодоление сил сопротивления преграды и ее пластическую деформацию. Затраты на пластическую деформацию преграды возрастают с ростом ее толщины и увеличением вязкости.

Работа A деформации и разрушения пакета включает в себя работу изгиба и среза. Работа изгиба определяется размерами ПЭ и жесткостью материала пакета. Работа среза определяется площадью поверхности среза и предельным напряжением сопротивления срезу. Она пропорциональна квадрату толщины пакета. Механизм разрушения и соотношение долей работы среза и изгиба меняется в зависимости от материала, толщины пакета, размеров ударяющего в него ПЭ. Так, при низкой жесткости пакета доля деформации изгиба, предшествующего срезу, велика. В расчетах это соотношение обычно учитывается эмпирическими коэффициентами.

Все известные аналитические зависимости хорошо описывают процесс бронепробития для недеформируемых поражающих элементов (ПЭ) и начальную стадию взаимодействия. Полную энергию, поглощенную средой в процессе пластических деформаций при расширении пробивного отверстия, рассчитаем по известной формуле Томсона

$$A_{\text{деф}} = \pi d^2 H \left[\frac{1}{2} \sigma + \rho \left(\frac{Vd}{L} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где d – калибр (диаметр головной части) ударника, м; H – толщина пробиваемого слоя преграды, м; σ – предельное напряжение для среды (предел кратковременной прочности), МПа; ρ – плотность среды, кг/м³; V – скорость ударника, м/с; L – длина головной части ударника, м.

Для стальной преграды (Ст.3) с параметрами $\sigma = 450$ МПа; $\rho = 7800$ кг/м³; $H = 0,002$ м и характеристиками ПЭ $V = 715$ м/с; $d = 0,00762$ м; $L = 0,012$ м; $E_k = 2019$ Дж энергия, затраченная на разрушение преграды $A_{\text{деф}}$, равна 627 Дж.

Для алюминиевой преграды (Д16) с параметрами $\sigma = 470$ МПа; $\rho = 2800$ кг/м³; $H = 0,002$ м и такими же характеристиками ПЭ получим $A_{\text{деф}} = 253$ Дж.

Для композитов предел прочности на растяжение обычно больше предела прочности на сжатие. С учетом этого для преграды из карбосилицида титана в рамках данной модели в формуле (3) используем значение $\sigma_{\text{сж}} = 300$ МПа; $\rho = 4530$ кг/м³; $H = 0,002$ м. Для тех же характеристик ПЭ работа на деформацию пакета $A_{\text{деф}} = 368$ Дж.

Запреградную скорость ПЭ W рассчитаем по экспериментально уточненной формуле [1]

$$W = \alpha (V^p - W_{\text{нсп}}^p)^{1/p}, \quad (4)$$

здесь p – параметр, зависящий от угла Θ подхода ПЭ к преграде и чувствительный к эффективной безразмерной толщине преграды:

$$p = 1,5 + z/3, \quad z = \frac{H}{d} \left(\frac{1}{\sin \theta} \right)^{0,75}; \quad \alpha - \text{зависит от механизма разрушения}$$

преграды при пробитии по типу прокалывания ($\alpha = 1$); $W_{\text{нсп}}$ – минимально необходимая (предельная) скорость сквозного пробития преграды, м/с, ее определим по универсальной формуле Жакоб де Марра

$$W_{\text{нсп}} = \frac{K (d^{0,75} \cdot H^{0,7})}{m^{0,5} \sin \theta}. \quad (5)$$

Здесь K – коэффициент сопротивляемости брони, устанавливается в соответствии с типом брони (для гомогенной и акустически мягкой брони $K = 1500 \div 2000$, для гетерогенной и жесткой брони $K = 2000 \div 3000$), d и H имеют размерность дм. При пробитии по типу выбивания пробки коэффициент α определим из выражения

$$\alpha = \frac{m}{m + m_{\text{пр}}},$$

где m – масса ПЭ, $m_{\text{пр}}$ – масса вырезаемой пробки, приближенно $m_{\text{пр}} = \rho p d^3 z / 4$. Тип разрушения преграды определяется экспериментально или теоретически.

Экспериментальные исследования преград из стальных и алюминиевых сплавов показывают, что пробитие по типу прокола реализуется при обстреле ПЭ тонких преград и сопровождается небольшим изгибом самой пластины. Обстрел мишеней из конструкционных сталей средней и низкой прочности дает деформационную картину в области проникания ПЭ в виде пролома без изгиба пластины. Данный механизм разрушения реализуется при толщинах преграды 4–7 мм. В интервале толщин 8–12 мм реализуется механизм деформирования в виде выпучины с отрывом или без отрыва откольного слоя в локальной зоне взаимодействия ПЭ с преградой. В некондиционных вариантах имеет место эффект начала отрыва пробки. Для проверки строгого соответствия модели существует теоретический критерий классификации механизмов разрушения: при $H/d < 1,25$ имеет место разрушение в виде срезания пробки.

При пробивании стальной преграды толщиной 2 мм ($K = 3000$) получим следующие оценки: баллистического предела $W_{\text{псп}} = 316$ м/с, запреградной скорости ПЭ $W = 560$ м/с, и по формуле (2) – запреградской кинетической энергии $E_{\text{пр}} = \frac{mW^2}{2} = 1233$ Дж. Для преграды из сплава Д16 ($H = 2$ мм, $K = 1500$): $W_{\text{псп}} = 158$ м/с, $W = 662$ м/с, $E_{\text{пр}} = 1731$ Дж. Для преграды той же толщины из композита Ti_3SiC_2 ($K = 2500$): $W_{\text{псп}} = 264$ м/с, $W = 602$ м/с, $E_{\text{пр}} = 1433$ Дж.

Таким образом, с некоторой погрешностью можно сделать вывод, что кинетическая энергия практически вся идет на деформацию преграды и запреградный эффект, небольшая оставшаяся часть (около 10 %) затрачивается на упругий удар, а для композита – и на развитие радиальных трещин.

Картина разрушения и деформирования преграды и ПЭ значительно усложняется на 2-й стадии при увеличении толщины пробития и не может быть описана представленной моделью (1)–(5). Пробивание преград толщинами более 4 мм сопровождается значительной деформацией (стягиванием) и разрушением ПЭ. При этом сохраняется высокая запреградная скорость оставшегося фрагмента ПЭ, сохраняющая

его эффективную пробивную способность за преградой. Запреградная скорость деформированного ПЭ ($H = 4$ мм) по формуле (4) составляет: для Ст.3 $W = 390$ м/с; энергия, поглощенная преградой при разрушении и деформировании, $A_{\text{деф}} = 1255$ Дж. С учетом 10% энергии на упругий удар (≈ 200 Дж) оставшаяся энергия $E \approx 566$ Дж идет на деформацию ПЭ и запреградный эффект. Для композита Ti_3SiC_2 оценки соответствующих параметров составляют: $W = 487$ м/с; $A_{\text{деф}} = 736$ Дж; $E \approx 1082$ Дж. На 3-й стадии (при больших толщинах) запреградная скорость стремится к нулю и вся энергия идет на пластическое деформирование преграды и ПЭ.

Оценка непробиваемости защитного пакета по соотношению (1) позволяет в явном виде получить соотношения для расчета толщины пакета, необходимой для удержания фрагмента заданных размеров при известной скорости удара. В отсутствие опытных данных такая оценка дает завышенные значения толщины панели.

Для моделирования соударения ПЭ с преградой требуется знание свойств материалов во всем диапазоне скоростей деформаций, характерных для условий соударения. Представленные далее методы и модели позволяют оценить результаты соударения ПЭ с преградой, возможность разрушения преграды и выхода фрагмента ПЭ за ее пределы, непосредственно определить параметры откольного разрушения (толщину и скорость откольного слоя).

2. Исследование физико-механических свойств бронезащитных пакетов

При достаточно большом на сегодня объеме результатов исследований высокоскоростного соударения тел не снимается проблема отбора эффективных композитов в составе сложных схем защитных конструкций и ударников. Накопленные данные об изменении фазово-структурных состояний в твердых телах при нетрадиционных методах получения открывают широкие возможности создания уникальных гетерогенных структур, в том числе слоисто-градиентных [2–4]. В получении таких материалов наблюдается тенденция совершенствования их состава и структуры и повышение ударной стойкости элементов в составе комбинированных преград. Характерным общим свойством керамик является их хрупкость с линейной зависимостью напряжений от

деформаций и значительно бóльшая прочность на сжатие, чем на растяжение. Основными требованиями к композиционным материалам в составе защитной преграды являются минимальная плотность, повышенные вязкопластические свойства, высокая прочность на сжатие (твердость). В бронебаллистике используется ряд керамик [4–9]. Армированные протяжёнными волокнами композиционные материалы могут иметь более высокие механические характеристики (прочность на растяжение, изгиб).

Перспективным в данном направлении является получение материала комбинированного строения на основе тугоплавкого соединения Ti_3SiC_2 методами твёрдофазного синтеза, химического осаждения из газовой фазы, одноосевого или изостатического горячего прессования, самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. В зависимости от метода, исходных реагентов и условий синтеза конечный продукт может быть получен в виде компактов различной степени пористости. Его среднюю плотность можно варьировать в широком диапазоне в зависимости от назначения. С точки зрения материалов конструкционного назначения наилучшие результаты на сегодняшний день достигнуты для плотных образцов Ti_3SiC_2 , изготовленных по технологии горячего изостатического прессования.

Наиболее достоверным методом оценки эффективности и исследования влияния физико-механических характеристик КМ на противоударную стойкость комбинированной защиты в условиях ударного нагружения является физический эксперимент. Сравнительные результаты баллистических испытаний керамик SiC и Ti_3SiC_2 в сочетании с алюминиевой пластиной, расположенной в контакте за керамической пластиной, представлены на рис. 1.

Высокая хрупкость разрушения таких материалов не обеспечивает противоударной защиты не только пластины, по которой наносится удар, но и соседних пластин, которые разрушаются под действием волновых эффектов и вторичных осколков. Введение металлической связки делает материал более пластичным, вязким, препятствует росту трещин при сжатии и особенно растяжении. При наличии хорошей адгезии незначительное количество связки увеличивает пластичность и вязкость разрушения.

Для исследования взаимодействия металлического и керамического компонентов использовали механосинтезированную шихту состава $3\text{Ti}+1,25\text{SiC}+0,75\text{C}$ и ПВММ на основе волокон сплава X20H80. Результаты баллистических испытаний пакета, включающего керамический Ti_3SiC_2 и ПВММ из волокон X20H80, показывают, что с введением ПВММ противоударная стойкость увеличивается, достигая максимума при определенном значении поверхностной плотности ПВММ (рис. 2).

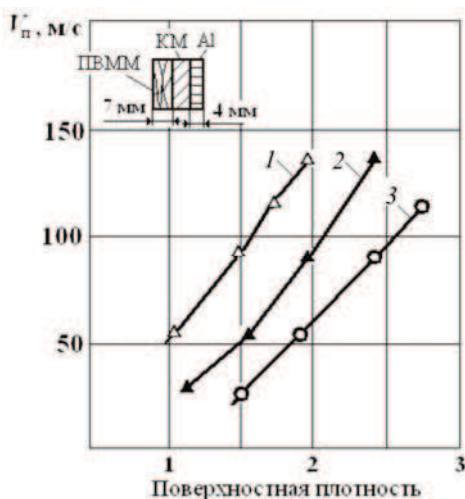


Рис. 1. Экспериментальный баллистический предел (V_n) в зависимости от поверхностной плотности керамики в слоистой преграде «керамика + алюминий» 1 – Ti_3SiC_2 +ПВММ (X20H80); 2 – Ti_3SiC_2 ; 3 – SiC

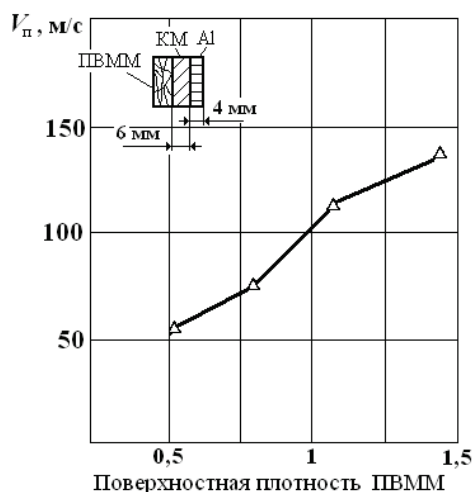


Рис. 2. Зависимость баллистического предела (V_n) от поверхностной плотности ПВММ (на основе волокон X20H80) карбосилицида титана Ti_3SiC_2 в слоистой преграде «керамика+ПВММ+Al»

Для установления уровня механических свойств синтезированных материалов на основе карбосилицида титана проведены испытания на изгиб однородной керамики и многослойных систем Ti_3SiC_2 –Al. Результаты испытаний представлены в виде диаграмм зависимостей разрушающей нагрузки P от стрелы прогиба f (рис. 3).

Кривая 1 соответствует приложению нагрузки, опорной со стороны алюминия; кривая 2 – нагрузка, опорная со стороны керамики; кривая 3 – однородная керамика Ti_3SiC_2 ; кривая 4 – алюминий. Для материала комбинированного строения Ti_3SiC_2 –Al характерно хрупко-вязкое разрушение с пилообразным упрочнением (кривая 1).

Таким образом, сравнение форм кривых нагружения свидетельствует о том, что у КМ комбинированного строения работа разрушения существенно выше.

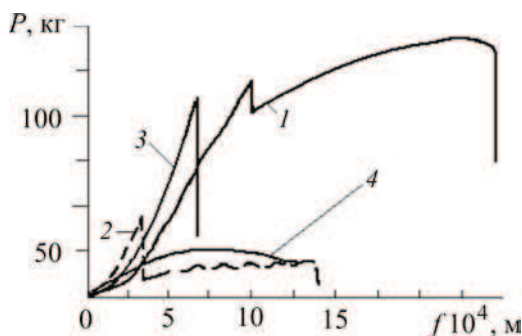


Рис. 3. Диаграммы испытаний на изгиб

3. Исследование противоударной стойкости бронезащитных пакетов

Для оценки противоударной стойкости материала на основе карбосилицида титана Ti_3SiC_2 применялись тесты на глубинное проникание в преграду, определение предельной скорости ее пробития либо остаточной скорости ударника за преградой.

В качестве ударников использовались шарики диаметром 3, 5, 8 мм из стального, титанового, алюминиевого сплавов. Удар производился в направлении нормали к лицевой поверхности преграды. Испытываемые на удар образцы представляют собой плоскопараллельные пластины толщиной 3...18 мм и линейным размером 100×100 мм или диаметром сборки 50 мм:

- однослойная преграда из материала на основе Ti_3SiC_2 . Толщина преграды – от 3 до 8 мм;
- двухслойная преграда, состоящая из композиционного материала на основе Ti_3SiC_2 , ПВММ из волокон сплава X20H80. Толщина первого слоя 8 мм, второго – 10 мм.

При ударно-волновом нагружении в большинстве случаев керамические образцы разрушаются на фрагменты и после опыта восстановлению не подлежат, поэтому определить глубину проникания ударников оказывается невозможным. Эффективность таких образцов можно определить косвенным методом, в частности по глубине проникания ударника в массивную алюминиевую плиту-«свидетель», контактирующую с образцом, по схеме, представленной на рис. 4.

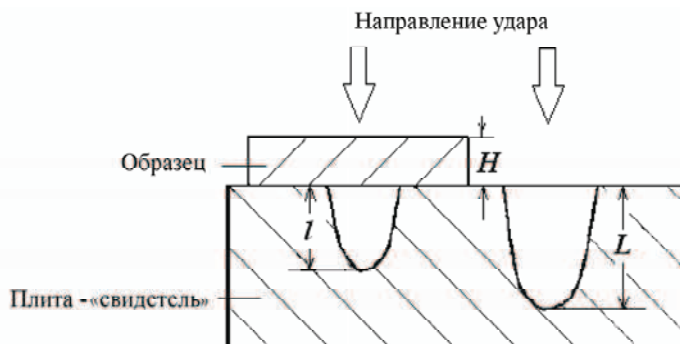


Рис. 4. Схема регистрации глубины проникания в слоистой преграде

Эффективность противоударной стойкости образцов (по глубине проникания ударника) Q определяется по глубине l и L кратеров в плите-«свидетеле» и толщине образца H :

$$Q = 1 - \frac{I_M l + I_K H}{I_M L}, \quad (6)$$

Здесь $I_M = \rho_M C_M$ – импеданс материала плиты, ρ_M – плотность материала, C_M – скорость звука; $I_K = \rho_K C_K$ – импеданс КМ образца, ρ_K – плотность КМ, C_K – скорость звука в КМ образца.

Если эффективность Q будет меньше или равна нулю, то пластина из композита не даст выигрыша в массе на единицу площади преграды. Поэтому необходимо определить в данных условиях удара усредненное по нескольким опытам значение глубины кратера в алюминиевой плите L при отсутствии керамики.

Экспериментальные данные и оценка эффективности Q керамических пластин Ti_3SiC_2 и слоистых конструкций по глубине проникания стальных ударников диаметром 6 мм и массой 1 г в зависимости от скорости удара, рассчитанная по соотношению (6), исходя из критерия равного веса на единицу площади, представлены на рис. 5.

Линия 1 отражает усредненное значение глубины кратера в алюминиевой плите, линия 2 – значение глубины кратера в плите с керамической пластиной, линия 3 – эффективность противоударной стойкости Q . Траектория кривой 3 свидетельствует о том, что максимальная эффективность керамики соответствует скоростям удара до 100 м/с, а с увеличением скорости соударения до 200 м/с она существенно снижается.

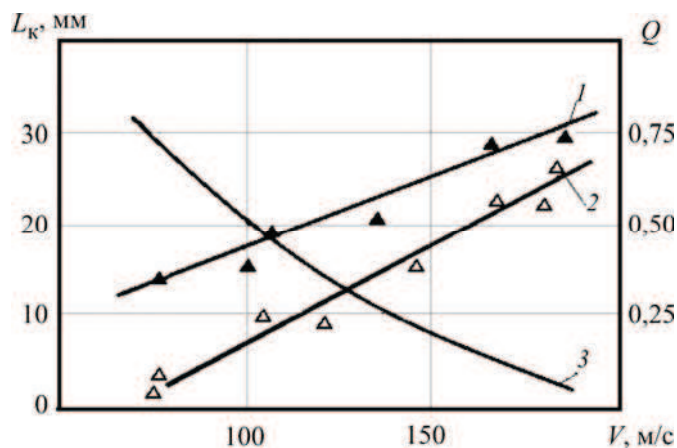


Рис. 5. Зависимость глубины проникания ударника в монолитную (1) и комбинированную конструкцию (2) и эффективности противударной стойкости (3) от скорости удара

Полученные экспериментальные данные свидетельствует об эффективности использования композиционных материалов на лицевой поверхности основных элементов конструкции. В этих условиях процесс разрушения керамики регулируется ее механическими свойствами.

Применение в качестве защиты лицевой поверхности керамики тонкого металлического экрана показывает снижение эффективности динамического сопротивления внедрению ударника, о чем свидетельствует увеличение относительной глубины проникания ударника в конструкцию в целом. Это можно объяснить тем, что такой экран при пробивании плотно охватывает ударник и не дает последнему разрушаться при ударе о керамику.

4. Эмпирическая оценка характера разрушения преграды при ударно-волновом воздействии

В нескольких работах [10, 11, 12–14] приведены результаты экспериментальных исследований поведения конденсированных тел при нагружении их косыми ударными волнами. Волны создавались путём взрыва листовых зарядов ВВ в контакте с исследуемыми материалами в режиме «скользящей детонации». Вдоль контактной границы по заряду двигалась детонационная волна, генерировавшая косую ударную волну в образце. Были использованы различные по своим свойствам взрывчатые вещества. Испытаниям были подвергнуты различные кон-

денсированные тела: металлы, пластики, жидкости. Полученная несколькими экспериментальными способами информация сводилась к следующему: измерены толщины отколов; средние скорости отколов; в некоторых случаях максимальные значения скорости свободной поверхности и непрерывная запись изменения скорости свободной поверхности во времени.

Выполненный теоретико-экспериментальный анализ явлений соударения тел, откольного разрушения и образования пробки позволил на основе теории размерностей получить критерий разрушения

$\eta = \left(\frac{J_{\text{н}}}{\rho_0 H C_0} \right)^{1/2}$. Он учитывает: параметр нагрузки – удельный механический импульс J ; свойства материала преграды – плотность ρ и скорость звука C_0 ; геометрию преграды – ее толщину H .

По результатам статистической обработки экспериментальных данных реальных экспериментов получены следующие зависимости безразмерных случайных величин: $\frac{\delta}{H} = f(\eta)$, $\frac{J_{\text{отк}}}{J} = f(\eta)$, $\frac{W}{C_0} = f(\eta)$,

$\frac{\delta}{H} = f\left(\frac{J_{\text{отк}}}{J}\right)$, $\frac{W}{C_0} = f\left(\frac{J_{\text{отк}}}{J}\right)$, где δ – толщина откола, W – скорость свободной поверхности пластины. Здесь откольный импульс $J_{\text{отк}}$ определен как произведение толщины откольного слоя на его скорость движения и на плотность материала: $J_{\text{отк}} = \delta W \rho_0$. Обработка экспериментальных данных в безразмерном виде дает статистическую наиболее существенную парную корреляцию величин $(\delta/H, \eta)$ и $(W/C_0, \eta)$,

а также соответствующие линейные зависимости $\frac{\delta}{H} = f(\eta)$ и $\frac{W}{C_0} = f(\eta)$. В работе [15] определены критерии зависимости кинематических параметров откола от условий нагружения, параметров состояния материала и преграды:

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{H} &= a + b \eta, \\ \frac{W}{C_0} &= a + b \eta. \end{aligned} \tag{7}$$

Для группы металлов значения коэффициентов a и b вместе со среднеквадратическими ошибками [15] приведены в таблице.

Коэффициенты для расчета критериев откола

a	σ_a	b	σ_b
$\delta/H=f(\eta)$			
0,010	0,035	1,050	0,146
$W/C_0=f(\eta)$			
0,025	0,021	0,288	0,088

Расчёты проводились для случая нагружения материала косой ударной волной в условиях подрыва листового заряда ВВ на поверхности образца.

Значение удельного механического импульса нагрузки J при воздействии ударников, то есть удельного количества движения, сообщаемого ПЭ материалу преграды, определяется по известной формуле

$$J = \frac{mV}{S}, \quad (8)$$

где m – масса ПЭ, V – скорость ПЭ при встрече с преградой, S – площадь контакта ПЭ с преградой.

Экспериментальные данные, полученные по результатам испытаний металлических и керамических пластин в условиях их обстрела боеприпасами из стрелкового оружия, сведены к следующим измерениям: скорость пули при встрече с преградой; толщина преград H и отколов δ в случаях их возникновения; зафиксированы случаи сквозного пробития и отсутствия разрушения преграды. К случаям образования отколов в зоне удара отнесены следующие: 1) образование откольных осколков со стороны тыльной поверхности преграды; 2) образование деформации на разрыв в виде магистральной трещины; 3) относительное увеличение толщины преграды («вздутие» стенки), принимаемое как $\frac{\Delta H}{H} = \frac{\delta}{H}$, при отсутствии ее сквозного пробития.

Для каждого проведенного эксперимента определены значения удельного импульса нагрузки J по (8) и обобщенного параметра условий ударно-волнового нагружения $\eta = \left(\frac{J}{\rho_0 H C_0} \right)^{1/2}$. Выявлено, что в

условиях воздействия ударных ПЭ откольный характер разрушения проявляется при значениях η приблизительно в пределах 0,1...0,5.

В рамках представленной модели для Ti_3SiC_2 при исходных данных (см. ниже) получена зависимость $\frac{\delta}{H} = f(\eta)$ (рис. 6).

Исходные данные для расчета откола

Масса ПЭ m , г	5,9
Диаметр ПЭ d , мм	9,27
Скорость соударения ПЭ с преградой V , м/с	100
Удельный импульс нагрузки $J = mV/S$, кг/(м·с)	8746,3
Плотность материала Ti_3SiC_2 ρ , г/см ³	4,53
Модуль Юнга E , ГПа	325
Коэффициент Пуассона ν	0,2
Модуль объемного сжатия $K = E/(3(1-2\nu))$, ГПа	181
Скорость звука в материале $C = (K/\rho)^{1/2}$, м/с	6313

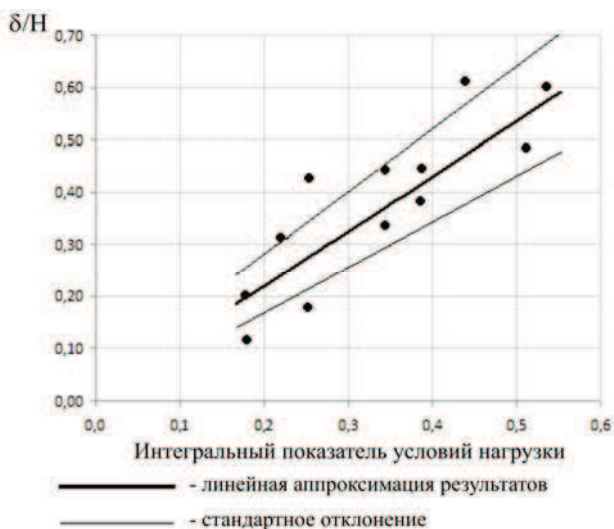


Рис. 6. Зависимость толщины откольного слоя от импульса нагрузки в безразмерных координатах и результаты экспериментов по ударному действию ПЭ для преград из карбосилицида титана

Совокупность экспериментальных данных, полученных при подрыве листового заряда ВВ и обстреле боеприпасами из стрелкового оружия, позволяет выделить на графике в координатах (δ/H) и η три зоны (рис. 7): I – зона отсутствия деформации на разрыв ($0 < \eta < 0,1$),

II – зона откольного разрушения ($0,1 < \eta < 0,5$), III – зона разрушения по механизму выбивания «пробки» ($0,5 < \eta$). В зоне I коррелируют результаты, полученные как при нагружении взрывом листового заряда ВВ, так и при нагружении ударом пули. В зоне II результаты, полученные при ударе ПЭ, подтверждают зависимости (7). На рис.7 по оси абсцисс отложены значения параметра η , по оси ординат – параметр $\chi = \frac{\delta}{H}$.

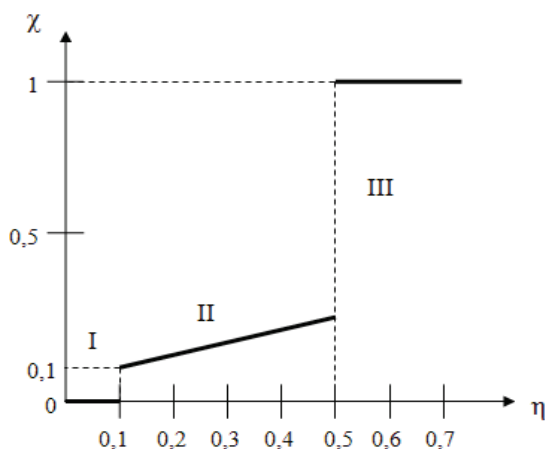


Рис. 7. Области разрушения материалов: область I – разрушение отсутствует; область II – откольное разрушение; область III – разрушение по механизму выбивания пробки

В области I $\delta = 0$, $\chi = 0$, разрушение отсутствует, и преграда подвергается только воздействию ударных волн и волн разгрузки, циркулирующих по толщине преграды. В области II $\delta \neq 0$, $\chi \sim \eta$, реализуется откольное разрушение, и толщина откола линейно зависит от параметра η . Заметим, что количественная зависимость $\chi(\eta)$ для различных типов материалов преград позволяет определить толщину откольного слоя δ . В области III $\delta = H$, $\chi = 1$, и ударник выбивает пробку. За пределами преграды ударник и пробка движутся как единое целое со скоростью, определяемой из условия сохранения импульса, сообщенного ударником.

В случае использования бронепанели, если при ударе по ней реализуются условия, соответствующие зоне III на рис. 7, то в корпус авиадвигателя распространяется ударная волна, а за нею – движущиеся как единое целое пробка и ударник. Если реализуются условия, соответствующие зоне II на рис. 7, то в корпус авиадвигателя распространяет-

ся ударная волна, а за нею – отколовшийся слой бронепанели. Если реализуются условия, соответствующие зоне I на рис. 7, то в корпус авиадвигателя распространяется ударная волна и основным повреждающим фактором является удельный механический импульс нагрузки.

Одним из параметров, характеризующих количественную способность передачи энергии, является импеданс материалов, который равен произведению плотности материала и скорости звука, $I = \rho_0 C_0$. Форма профиля ударной волны, распространяющейся в корпус авиадвигателя, существенно зависит от соотношения акустических жесткостей ударника, бронепанели и материала корпуса. Под жесткостью здесь понимается величина, равная произведению плотности на скорость звука. Для бронепанели, скорее всего, следует принять эффективную жесткость, поскольку бронепанель представляет собой слоистую систему.

Рассмотрим несколько случаев: 1) $\alpha_{уд} > \alpha_к > \alpha_п$; 2) $\alpha_п > \alpha_{уд} > \alpha_к$; 3) $\alpha_{уд} > \alpha_п > \alpha_к$. Здесь $\alpha_{уд}$ – жесткость ударника; $\alpha_к$ – жесткость материала корпуса; $\alpha_п$ – эффективная жесткость панели бронезилов. Анализ волновых течений в этих трех случаях дает следующие результаты (рис. 8). Конечное давление в ударной волне равно значению, достигаемому при ударе ПЭ по преграде, то есть без бронепанели. На рис. 8 эта величина обозначена пунктиром. Изменение давления P по длине ударной волны (форма профиля волны) различно для разных случаев. В случае соотношения жесткостей 1) давление увеличивается, ступенчато нарастая и достигая предельного значения. В случае 2) характер увеличения давления подобен, но значения давлений на каждой ступеньке больше, чем в случае 1). В случае 3) давление во фронте волны существенно выше, чем в случаях 1) и 2). Изменение давления носит характер затухающих колебаний вокруг предельного значения.

Экспериментальные исследования пробивной способности пуль стрелкового оружия и противоударной стойкости бронепанелей выявили усиление защитных свойств конструкции из легких металлов и сплавов при дополнительном использовании накладок из карбосилицида титана. На рис. 9 представлена зависимость изменения предельной скорости пробивания штатной пулей от толщины лицевого защитного покрытия, выполненного из Ti_3SiC_2 .

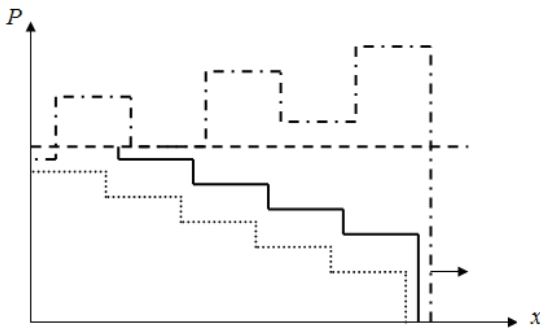


Рис. 8. Профиль ударной волны в преграде при различных соотношениях жесткостей ударника, бронепанели и корпуса: 1); 2) —; 3) - · - ·

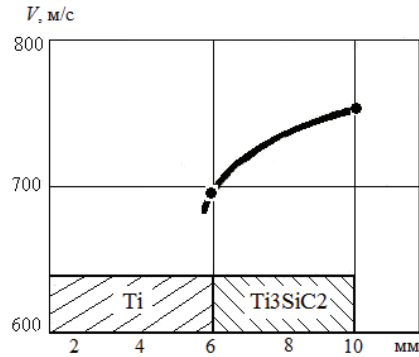


Рис. 9. Зависимость предельной скорости пробития сборки от толщины лицевого композитного слоя

Левая крайняя точка характеризует предельную начальную скорость пробивания защитной титановой бронепанели толщиной 6 мм без лицевого покрытия ($V = (693 \pm 5)$ м/с), правая – с лицевой пластиной толщиной 4 мм ($V = (750 \pm 5)$ м/с). При контакте пули с титановой бронепанелью без защитного слоя произошло ее сквозное пробивание по типу выбивания пробки. В случае когда титановая пластина защищена с лицевой стороны композитным слоем толщиной 4 мм, вокруг места контакта наблюдаются сколы, сквозное пробивание отсутствует.

Нанесение защитного слоя из карбосилицида титана с высокими прочностными характеристиками на сжатие на лицевую поверхность металлической пластины с высокой твердостью (НВ 300–400) обеспечивает повышение противоударной стойкости за счет потери кинетической энергии на деформационные процессы самой пули и конструкции. При контакте пули с защитным композитом на начальной стадии взаимодействия происходит радиальное деформирование головной части пули, что приводит к увеличению площади контакта. Сила сопротивления при проникании пули в преграду пропорциональна удельному механическому импульсу. Вследствие этого сила сопротивления внедрению со стороны металлической пластины увеличивается, что обеспечивает интенсивное затухание скорости внедрения пули.

Анализ результатов экспериментов показывает, что в ударнике не возникает областей поврежденности в течение всего периода процесса взаимодействия. В керамических пластинах разрушения форми-

руются непосредственно в области воздействия ударника. За счет волнового фактора формируются области поврежденности вблизи тыльной поверхности. В периферийной области с тыльной стороны пластин также формируются зоны поврежденности, и тыльный слой материала интенсивнее разрушается в области контакта с ярко выраженным максимумом деформации (до состояния «песка»). Со временем, с образованием локальных экстремумов, уровень поврежденности пластины увеличивается и наблюдается тенденция к полному макроразрушению под действием распространяющейся сети разветвленных трещин.

Заключение

Экспериментально выявлена перспектива использования материалов при производстве бронепанелей на основе карбосилицида титана Ti_3SiC_2 и ПВММ из волокон сплава X20H80, по своим характеристикам удовлетворяющих возможностям их применения при проектировании защитных элементов и систем. Бронепанель устойчива к воздействию агрессивных факторов внешней среды, не требует особых условий хранения и транспортировки, поддается высокоточной механической обработке.

Представленные результаты баллистических экспериментов показывают преимущество защитных свойств композиционного материала комбинированного строения на основе Ti_3SiC_2 и ПВММ из волокон сплава X20H80 перед традиционными металлами и из различных сплавов. Это объясняется свойствами структуры материалов, проявляющихся при существенно ударно-волновом характере процессов, сопровождающих высокоскоростное взаимодействие.

Библиографический список

1. Lambert J.P. Ballistic Research Laboratory, ARBRL – MP-02828 (AD B027660 L), 1978.
2. Мержанов А.Г. Физическая химия. Современные проблемы. – М.: Химия, 1983. – С. 6–47.
3. Сараев Ю.Н. Импульсные процессы сварки и наплавки. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-е, 1994. – 189 с.
4. Силантьев А.В., Ададунов Г.А. Модифицирование свойств и синтез ВТСП-керамик путем ударного сжатия // Сверхпроводимость: физ., хим., техн. – 1991. – Т. 4, № 2. – С. 308–317.

5. Viechnicki D.J., Slavin M.J., Kliman V.I. Development and current status of armor ceramics // Ceramic bulletin. – 1991. – Vol. 70, No 6. – P. 1035–1039.

6. Расчетно-экспериментальный анализ поведения металлокерамики на основе диборида титана и карбида бора в условиях ударного нагружения / Н.Н. Белов [и др.] // Теоретические основы химической технологии. – 2005. – Т. 39, № 6. – С. 659–665.

7. Исследование процессов деформирования и разрушения хрупких материалов / Н.Н. Белов [и др.] // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2001. – Т. 7, № 2. – С. 131–142.

8. Partom Y., Littlefield D.L. Dependence of ceramic armor resistance on projectile velocity // 14th International Symposium on Ballistics. – Quebec. Canada, 1993.

9. Кожушко А.А., Рыкова И.И., Синани А.Б. Сопротивление керамик внедрению ударяющего тела при высоких скоростях взаимодействия // ФГВ. – 1992. – Т. 28, № 1. – С. 89–93.

10. Рыбаков А.П. Исследование откольных явлений в конденсированных телах при нагружении косыми ударными волнами // Детонация. Критические явления. Физико-химические превращения в ударных волнах. – Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1978. – С. 140–144.

11. Рыбаков А.П. Исследование откольного разрушения конденсированных тел // ЖПМТФ. – 1981. – № 5. – С. 144–146.

12. Действие взрыва листового заряда ВВ на алюминиевую пластину / Е.В. Ментешов [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1967. – Т. 3, № 2. – С. 286–290.

13. Рыбаков А.П. Отколы в стали при нагружении с помощью взрыва листового заряда ВВ и удара пластиной // ЖМПТФ. – 1977. – № 1. – С. 151–155.

14. Вологжанин О.Ю., Вшивков О.Ю., Рыбаков Н.А. Границы областей применения моделей поведения преграды при воздействии ударников // Вестник ИжГТУ. – 2010. – № 2 (46). – С. 16–18.

15. Удельный импульс как физический критерий определения параметров откола / О.Ю. Вшивков [и др.] // Вестник ПГТУ. Прикладная математика и механика. – Пермь, 2006. – № 1. – С. 159–163.

Получено 02.07.2011

O.Y. Vshivkov

The Perm national research polytechnic university

DEFORMATION AND FRACTURE OF LAYERED COMPOSITE MATERIALS WITH A COMPLEXLY ORGANIZED STRUCTURE AT THE SHOCK-WAVE LOADS

The features of the behavior of packets of composite materials under shock-wave loading revealed, the correlation relations between the parameters macrodestruction with dynamic mechanical properties of materials established, the parameters of penetration into them hitting percussion pieces, penetration and spalling identified. The values of characteristics of compounds porous-fibrous metallic material and ceramic material based on carbo-silicide titanium for their successful application as defensive elements in the barriers and constructions been found.

Keywords: Carbo-silicide titanium, composite material, porous-fibrous metallic material, the specific mechanical impulse, spall, shock resistance, impedance of the material.