

## **Керамическая броня**

Эффективная защита от высокоэнергетических средств поражения с высокой проникающей способностью - бронебойных винтовочных пуль с термоупрочненными сердечниками (ТУС) (6-й и 8-й классы защитных структур по ГОСТ Р 50744-95) - немыслима без использования в качестве элемента защитной структуры керамики - высокотвердого, но очень хрупкого материала.

К керамике относят материалы, получаемые спеканием или горячим прессованием порошков минеральных веществ. Для изготовления бронеэлементов используют оксидную, карбидную, боридную, нитридную и смесевые керамики. Обычной технологией получения керамических изделий является спекание при высокой температуре предварительно отпрессованных заготовок. С помощью такой технологии получают, например, корундовую керамику ( $Al_2O_3$ ). Если при спекании происходят химические превращения, то такую керамику называют реакционно-спеченной, например керамика на основе карбида кремния SiC. Спеченные керамики характеризуются небольшой пористостью, ухудшающей ее механические свойства. Малопористое состояние керамических изделий с высоким уровнем механических свойств может быть достигнуто путем горячего прессования исходных порошков при высокой температуре. Например, с помощью горячего прессования при 2200 °C получают керамику на основе карбида бора  $B_4C$ .

Структурно керамика состоит из кристаллической и аморфной фаз, а также пор. Свойства этих фаз и пористость определяют механические свойства керамических бронеэлементов. Чем меньше размеры кристаллических частиц, чем меньше в керамике содержится аморфной фазы, и чем меньше пористость, тем выше прочность и твердость керамики.

Обращает на себя внимание чрезвычайно высокая твердость в сочетании с низкой ударной вязкостью. Именно высокая твердость керамики определяет защищающую способность керамической брони.

Процесс ударного взаимодействия ударников с преградой разделяется на очень короткую начальную ударно-волновую стадию и последующую достаточно длительную стадию динамического деформирования и (или) проникания ударника в преграду без выраженных ударно-волновых

процессов. Ударно-волновая стадия взаимодействия характеризуется наличием интенсивных ударных волн и волн разрежения как в преграде, так и в ударнике. Максимальное давление  $p_{ув}$  на границе раздела ударник-преграда, развиваемое на ударно-волновой стадии, может быть оценено с помощью соотношения

$$p_{ув} = \frac{(\rho c)_{пр}(\rho c)_{уд}}{(\rho c)_{пр} + (\rho c)_{уд}} v_{уд}$$

где  $\rho$  - плотность материала;  $c$  - скорость звука;  $v_{уд}$  - скорость ударника; подстрочные индексы «пр» и «уд» относят соответствующие величины к преграде и ударнику. Для случая взаимодействия стальных ударников с корундом в диапазоне значений скорости 500 ... 1000 м/с получим  $p_{ун} = 10...20$  ГПа. Поскольку гюгониевский предел упругости малопористой корундовой керамики плотностью 3,9 г/см<sup>3</sup> превосходит ~50 ГПа, то ударные волны в указанном диапазоне значений скорости являются упругими. Длительность ударно-волновой стадии  $t_{ув}$  невелика и для цилиндрического ударника с плоским торцом диаметром  $d_{уд}$  по порядку величины составляет  $d_{уд}/(2c_{пр})$ . Так, при воздействии ударника диаметром 7,62 мм по преграде из корундовой керамики  $t_{ув} \approx 0,3...0,4$  мкс. По истечении этого времени ударная волна быстро затухает. Если ударник заострен, что характерно для сердечников пуль, то выделить начальную ударно-волновую стадию достаточно сложно, так как диаметр начальной области контакта мал и возникающие в начальный момент времени ударные волны быстро затухают как из-за воздействия тыльных волн разгрузки, так и из-за сферической геометрии фронта ударной волны.

По причине малой длительности по сравнению с полным временем ударно-проникающего взаимодействия ударно-волновую стадию в задачах конечной баллистики обычно не учитывают. Однако на этой стадии при схождении радиальной волны разгрузки, в которой материал преграды приобретает радиальную составляющую скорости, направленную от оси симметрии ударного взаимодействия, вследствие невысокой прочности керамики на растяжение возможно ее разрушение в небольшой области непосредственно под ударником.

На последующей стадии динамического взаимодействия ударника с жесткой преградой контактное давление  $p_k$  можно оценить с помощью двучленной зависимости, учитывающей как прочностные свойства, так и давление скоростного напора материала ударника:

$$p_k = \sigma_{т.д} + k\rho_{уд}v_{уд}^2$$

где  $\sigma_{т.д}$  - динамический предел текучести материала ударника;  $k$  - коэффициент формы (при растекании ударника вдоль плоской поверхности преграды  $k = 0,5$ ). При воздействии по преграде стальных пуль, имеющих  $\sigma_{т.д} = 0,5...1,5$  ГПа в скоростном диапазоне  $v_{уд} = 500...1000$  м/с, значение  $p_k$  не превосходит 4,5 ГПа. Сравнение возникающего контактного давления с твердостью керамик  $H_k$  показывает, что оно значительно ниже значений твердости по Виккерсу HV, изменяющейся в пределах 15...28 ГПа. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что в начале динамической стадии взаимодействия проникания даже термоупрочненных сердечников бронебойных пуль в керамику происходить не будет - керамическая преграда ведет себя подобно абсолютно жесткой преграде.

Торможение пуль на «жесткой» керамической преграде сопровождается разрушением (срабатыванием) их головной части и снятием рубашки. Такой характер начальной фазы взаимодействия бронебойных пуль с керамической преградой имеет прямое экспериментальное подтверждение, полученное путем рентгенографирования процесса взаимодействия бронебойных пуль с корундовой керамикой.

Твердость керамики  $H_k$ , подвергнутой высокоскоростному удару, вследствие ее разрушения в процессе волнового формирования поля сдвиговых и растягивающих напряжений, характерного для контактных задач, быстро уменьшается. Но до тех пор, пока твердость разрушающейся керамики превосходит контактное давление, проникания пули в нее не происходит. Условие жесткости преграды  $H_k > p_k$  выполняется в течение некоторого времени  $t_p$ . По истечении этого времени при  $t > t_p$  начинается проникание частично сработавшейся пули в разрушенную керамику, которое продолжается до тех пор, пока давление на контактной границе превосходит твердость разрушенной керамики  $p_k > H_k$ . В момент времени  $t = t_{пр}$  давление на контактной границе, по причине торможения пули, становится равным твердости разрушенной керамики  $p_k = H_k$  и проникание пули в нее прекращается. Режимы проникания определяются взаимным положением зависимостей от времени твердости керамики  $H_k(t)$  и контактного давления  $p_k(t)$ .

Разрушенную керамику на начальной стадии формирования и ускорения конической области можно уподобить пористому телу, состоящему из тесно прилегающих друг к другу керамических фрагментов и обладающему определенной сдвиговой прочностью вследствие трения между фрагментами, особенно в условиях действия сжимающих напряжений. Если сдвиговые напряжения превышают силы трения, то возможно

пластическое деформирование разрушенной керамики, которое может сопровождаться как дополнительным разрушением керамических фрагментов, так и увеличением объема разрушенной керамики вследствие их разворота.

Все это приводит к тому, что, во-первых, проникание остатков пули в разрушенную керамику сопровождается не только инерционным, но и прочностным сопротивлением, во-вторых, разрушенный керамический конус под действием сил взаимодействия с проникающей пулей ускоряется как твердое тело и включает во взаимодействие последующие слои подложки еще до подхода к ним пули.

Наличие остаточной прочности у разрушенной керамики, находящейся в сжатом состоянии, является важным дополнительным фактором торможения остатков пули и характеризует качество керамики как баллистического материала. В некоторых работах, например, в разрушенную керамику уподобляют сыпучей среде, не обладающей прочностью, хотя приведенные в этой работе экспериментальные данные напрямую указывают на наличие остаточной прочности у разрушенной керамики.

В связи с широким применением высокотвердых хрупких материалов (керамика, стекло, ситаллы и др.) для защиты от ударно-проникающих воздействий различных средств поражения разработано довольно много динамических моделей разрушения хрупких материалов. Практически все современные модели используют концепцию, согласно которой разрушение представляет собой процесс зарождения и развития в материале повреждений (дефектов, пор, трещин и т.п.). Этот процесс описывается различными кинетическими уравнениями, построенными на основании тех или иных механизмов разрушения. Механические характеристики деформируемого материала полагаются зависящими от меры поврежденности материала, связанной с историей изменения напряженно-деформированного состояния материальных частиц, составляющих деформированное тело. В качестве меры поврежденности керамического материала используется пористость разрушенного материала.

В этой модели предел прочности хрупкого материала  $\sigma$  в процессе его разрушения меняется от предела прочности  $\sigma_0$  исходного неповрежденного материала до предела прочности  $\sigma_p$  полностью разрушенного (измельченного) материала. Соответствующее уравнение имеет вид

$$\sigma = \sigma_0 - D(\sigma_0 - \sigma_p)$$

где  $D$  – поврежденность ( $0 \leq D \leq 1$ ).

Поврежденность определяется как относительная накопленная пластическая деформация

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{\text{пл}}}{\varepsilon_{\text{пл}}^p},$$

где  $\Delta \varepsilon_{\text{пл}}$  – элементарная пластическая деформация (например, за один шаг интегрирования);  $\varepsilon_{\text{пл}}^p$  – условная предельная пластическая деформация при постоянном давлении  $p$ , при которой происходит разрушение хрупкого материала. При вычислении  $\varepsilon_{\text{пл}}^p$  учитывается что, во-первых, действие сжимающих напряжений приводит к некоторому упрочнению хрупких материалов и, во-вторых, разрушение хрупких материалов может происходить под действием не только растягивающих, но и сжимающих напряжений:

$$\varepsilon_{\text{пл}}^p = D_1(P + T_p)^{D_2}$$

где  $P=p/Y$  – безразмерное давление;  $Y$  – гюгониевский предел упругости (предел упругости на ударной адиабате материала);  $T_p = T_p^*/Y$  – безразмерное максимальное напряжение всестороннего растяжения, которое может выдержать материал без разрушения;  $D_1, D_2$  – постоянные.

После того как материал начинает разрушаться ( $D>0$ ), давление в материале увеличивается на  $\Delta p$  вследствие превращения высвобождающейся упругой энергии в потенциальную энергию сжатия. При  $D=1$  вся упругая энергия из-за потери материалом сдвиговой прочности превращается в потенциальную энергию всестороннего сжатия.

Роль керамического слоя многослойной преграды сводится к разрушению головной части пули, увеличению площади воздействия на последующие слои преграды и поглощению части кинетической энергии остатков пули в процессе ее торможения в уже разрушенной керамике. Для удержания разрушенной керамики в сжатом состоянии и предотвращения разлета осколков необходима достаточно прочная и энергоемкая подложка, останавливающая движение остатков пули и разрушенной керамики в процессе своего деформирования без разрушения при допустимой для защищаемого объекта высоте тыльного деформационного купола.

Поскольку в процессе распространения по керамическому слою ударные волны быстро затухают, предполагается, что для достижения достаточных



для разрушения уровня растягивающих напряжений и времени их действия (динамическое разрушение имеет релаксационный характер) требуется несколько волновых пробегов по слою керамики.