

Взаимодействие пули с текстильной броней

Основой текстильной брони являются высокопрочные высокомодульные синтетические волокна. Полимеры, из которых получают такие волокна, делятся на жестко- и гибкоцепные. Примеры жесткоцепных - ароматические полиамиды: полипарафенилентерефталамид (Кевлар, США; Тварон, Голландия), полиамидобензимидазол на основе гетероциклического парадиамина и терефталоилхлорида (СВМ, Русар, Армос, Россия) и др. Волокна Русар и Армос имеют самые высокие механические свойства среди всего семейства параарамидных волокон. Прочные ковалентные связи, соединяющие с помощью амидных групп -СО-NH- ароматические кольца как в продольном, так и в поперечном направлениях, придают длиномерным макромолекулам жесткость.

Средние физико-механические характеристики параарамидных волокон: плотность $\rho_m = 1,45 \dots 1,47 \text{ г/см}^3$; модуль упругости (динамический) $E = 100 \dots 150 \text{ ГПа}$; прочность на растяжение $\sigma_p = 3,5 \text{ ГПа}$; удлинение при разрыве $\varepsilon_p = 3,5 \%$. Сочетание высокого модуля упругости и относительно низкой плотности полимера приводит к очень высоким значениям продольной скорости упругих волн в волокнах $c = \sqrt{E/\rho_m} = 9 \dots 10 \text{ км/с}$, обеспечивающей быстрое превращение кинетической энергии пули в работу деформирования достаточно большого объема защитного материала, что наряду с исключительной высокой прочностью волокон на растяжение определяет эффективность текстильной брони.

Как преграда текстильная броня представляет собой сложную дискретную структуру с внутренними степенями свободы, поскольку нити, из которых состоит текстильный бронепакет, обладают способностью к смещению как в направлении воздействия пули, так и в плоскости ткани. Именно способность нитей ткани испытывать смещение при ударно-проникающем воздействии пуль обеспечивает возможность преобразования кинетической энергии пуль в энергию упругого растяжения нитей ткани.

Выделяют следующие стадии взаимодействия пули с многослойным текстильным бронепакетом:

1. Начальная стадия взаимодействия - уплотнение ткани в лицевых слоях пакета, сжатие и ускорение материала в направлении движения пули. Разрушение нитей ткани на этой стадии, иногда называемое

раздавливанием, имеет сдвиговый характер. Смещение пробитых слоев ткани невелико. В связи с кратковременностью начальной стадии торможение пули незначительно.

2. Стадия проникания пули в бронепакет с растяжением и последующим обрывом нитей слоев ткани. Вытягивание нитей и поперечное смещение слоев невелико, деформация растяжения нитей в лицевых слоях ткани может превосходить предельную. На этой стадии происходит основное торможение пули и преобразование основной части ее кинетической энергии в работу упругого растяжения и обрыва нитей.
3. Стадия окончательного торможения пули с образованием тыльного деформационного купола без обрыва нитей. Деформационный купол формируется за счет вытягивания нитей из ткани. Остаточная кинетическая энергия пули и ускоренной части бронепакета, а также энергия упругого растяжения нитей расходуются на совершение работы сил трения при вытягивании нитей.

На начальной стадии ударного взаимодействия пули с текстильным пакетом в нем возникает волна сжатия, в которой происходит вовлечение в поперечное движение слоев ткани. Для оценки амплитуды этой волны необходимо знать характеристики динамической сжимаемости пакета, который представляет собой пористый материал, состоящий из полимерных нитей и воздуха. В механике пористых материалов в качестве характеристики пористости часто используют коэффициент, равный отношению объема пор $V_{\text{пор}}$ к объему образца V_0 :

$$\mu = \frac{V_{\text{пор}}}{V_0} = \frac{V_0 - V_M}{V_0} = 1 - \frac{V_M}{V_0} = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_M} = 1 - K_V$$

где V_M и ρ_M – объем и плотность полимера; ρ_0 – плотность текстильного пакета, K_V – используемый в текстильном материаловедении коэффициент объемности. Пористость текстильного пакета в соответствии с его строением имеет три уровня: внутринитяная, единичного слоя ткани и межслойная. Оценим по порядку величины коэффициенты μ каждого уровня.

Комплексная нить образуется из множества волокон. Плотность заполнения нити волокнами зависит от плотности их укладки в контуре поперечного сечения нити. Полагая, что поперечные сечения волокон представляют собой круги одного и того же диаметра, и исходя из геометрических соображений, можно получить следующие оценки для

максимального $\mu_{n \max}$ (квадратная укладка волокон) и минимального $\mu_{n \min}$ (гексогональная укладка волокон) значений внутринитяной пористости:

$$\mu_{n \max} = 1 - \frac{\pi}{4} \approx 0.21, \quad \mu_{n \min} = 1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \approx 0.093$$

Реальное значение пористости будет соответствовать некоторому среднему значению $\mu_n = 0,15 \dots 0,17$.

Пористость слоя зависит от типа ткани. Полагая, что слой ткани образу-ется плотной укладкой нитей двух ортогональных семейств основы и утка, можно получить ту же оценку пористости слоя ткани: $\mu_c = 0,15 \dots 0,17$.

Используя для оценки межслойной пористости тот же подход, получим ту же оценку межслойной пористости текстильного пакета: $\mu_n = 0,15 \dots 0,17$.

Итоговая пористость текстильного пакета будет равна сумме пористостей всех уровней: $\mu = \mu_n + \mu_c + \mu_n = 0,45 \dots 0,51$, что примерно соответствует пористости нитей в бобине. Реальная пористость текстильного пакета может быть несколько выше и составлять $0,5 \dots 0,6$.

Для оценки амплитуды волны сжатия, возникающей в текстильном пакете в начальный момент ударного взаимодействия, предположим, что во фронте этой волны происходит уплотнение пакета до сплошного состояния, т. е. плотность скачком изменяется от начального значения ρ_0 до плотности полимера ρ_m , из которого изготовлена ткань. Применяя законы сохранения массы и импульса для начального и конечного состояний пакета, получим

$$\rho_0 D = \rho_m (D - u),$$

$$p = \rho_0 u D,$$

где D – скорость фронта волны сжатия; p , u – давление и массовая скорость за фронтом волны. Из этих законов сохранения следуют соотношения для волновой скорости D и давления p :

$$D = \frac{u}{\mu}, \quad p = \frac{\rho_0 u^2}{\mu}$$

Оценим давление, возникающее при ударе пули пистолета ПМ ($V_n = 330$ м/с) по текстильному пакету из ткани с пористостью $\mu = 0,6$. Пусть ос-новой ткани являются полиaramидные волокна с плотностью $\rho_0 = 1,44$ г/см³.

Поскольку $\rho_0 = (1 - \mu)\rho_m$, то $\rho_0 = 0,576$ г/см³. Пренебрегая сжимаемостью материала пули по сравнению со сжимаемостью текстильного пакета, получим $u = V_n$, $D = 550$ м/с, $p = 0,105$ ГПа.

Прочность современных полиарамидных нитей на растяжение $\sigma_p = 3,0 \dots 4,5$ ГПа, поэтому возникающее давление оказывается порядка 3% от σ_p . По данным, приведенным в, поперечная прочность параарамидных волокон на сжатие $\sigma_{сж}$ составляет всего 1,0 ... 1,5% от прочности на растяжение, поэтому волокна в зоне высокого давления, возникающей при ударе пули, окажутся разрушенными вследствие давления.

При воздействии цилиндрического ударника с плоским торцом зона высокого давления совпадает с областью одномерного сжатия. В лицевых слоях ткани размер зоны высокого давления совпадает с диаметром ударника. В последующих слоях ввиду распространения в сжатую область боковых волн разгрузки диаметр зоны высокого давления быстро уменьшается и на глубине, равной примерно радиусу ударника, волны разгрузки смыкаются на оси симметрии ударного взаимодействия. Уплотненная в зоне высокого давления часть текстильного бронепакета, находящаяся непосредственно под ударником, вследствие сдвига относительно всего бронепакета отделяется от него и присоединяется к плоскому торцу, образуя удобообтекаемую присоединенную массу.

При воздействии пули с полусферическим торцом зона высокого давления в лицевом слое ткани ограничена радиусом отрыва поперечной волны в нитях ткани от поверхности головной части пули. Как известно, при поперечном ударе по нити в ней начинают распространяться продольные и поперечные волны.

Скорость перемещения крайних точек контакта головной части пули с прямолинейной нитью, расположенной вдоль оси x ,

$$\frac{dx}{dt} = v_x = v_{\Pi} \frac{r_{\Pi} - v_{\Pi} t}{\sqrt{r_{\Pi}^2 - (r_{\Pi} - v_{\Pi} t)^2}},$$

где r_{Π} - радиус пули. В начальный момент времени эта скорость велика: при $x \rightarrow 0$ $v_x \rightarrow \infty$. При внедрении пули на высоту головной части указанная скорость стремится к нулю: при $x \rightarrow r_{\Pi}$ $v \rightarrow 0$. Обозначим радиус пятна контакта, при котором скорость v_x достигнет некоторого значения α , через r_{α} . Из геометрических соображений нетрудно получить соотношение:

$$\frac{r_{\alpha}}{r_{\Pi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{v_{\Pi}^2}}}$$

При величине α , равной скорости продольной волны $c \approx 8000$ м/с и $v_n = 315$ м/с (для пули пистолета Макарова), радиус зоны, из которой не может выйти продольная волна, мал и составляет

$$r_a \approx \frac{v_n}{c} r_n = 0,045 r_n$$

При значении α , равном скорости поперечной волны $b = 700 \dots 900$ м/с, радиус шарика пятна контакта составит: для пули пистолета ПМ $r_\alpha = 0,4 r_n = 2,1$ мм, для шарика с $v_n = 500 \dots 600$ м/с и $r_n = 3$ мм $r_\alpha = 0,7 r_n = 2,1$ мм. В обоих случаях диаметр пятна контакта оказывается равным ~ 4 мм. Измеренный диаметр области разрушения в бронепакетах из ткани артикула 56319 колеблется в пределах $3,5 \dots 4,5$ мм, что соответствует теоретической оценке.

Время t_α , за которое радиус зоны контакта достигнет величины r_α , может быть определено с помощью соотношения

$$t_a = \frac{r_n}{v_n} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_a}{r_n} \right)^2} \right)$$

Смещение пули y_a в этот момент времени

$$y_a = v_n t_a = r_n \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{r_a}{r_n} \right)^2} \right)$$

Для пули пистолета ПМ и $r_0 = 0,4 r_n$ $t_0 = 1,4$ мкс и $y_a = 0,1 r_n \approx 0,45$ мм. Волна сжатия в пакете за время t_0 переместится на глубину $0,8$ мм, вдоль нитей продольная волна растяжения распространится примерно на 10 мм от оси ударного взаимодействия. Таким образом, начальная волновая стадия взаимодействия пули пистолета ПМ проявляется в течение очень короткого времени и затрагивает не более $2 \dots 3$ слоев ткани текстильного бронепакета.

По истечении времени t_0 поперечная волна отрывается от крайней точки контакта пули со слоем ткани, и нити ткани начинают вовлекаться в поперечное движение, а распространяющаяся в нитях продольная волна растяжения поставляет материал в очаг деформации. Из-за дискретной структуры текстильного пакета амплитуда волны сжатия быстро убывает, но остается достаточной для формирования очага деформации.

На начальной стадии взаимодействия нити ткани, облекая поверхность полусферической головной части пули, кроме сжатия подвергаются растяжению. Деформация растяжения нитей на оси симметрии растет пропорционально перемещению пули и обратно пропорционально радиусу ее головной части.