

УДК 629.7.002 (075.8)

Разработка многослойных комбинированных структур для защиты летательных аппаратов от поражения стрелковым оружием

Ларин А. А.^{1*}, Резниченко В. И.², Артемьев А. В.^{2}**

¹*Московская академия рынка труда и информационных технологий (МАРТИТ), ул. Молодогвардейская, 46, крп.1, Москва, 121351, Россия*

²*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

** e-mail: kmit@martit.ru*

***e-mail: sigma_mai@mail.ru*

Аннотация

Представлена методика разработки многослойных бронезащитных конструкций для обеспечения требуемого уровня защищенности объекта от воздействия стрелкового оружия калибром до 12.7мм. Рассмотрены механизмы поглощения энергии удара различными материалами, в том числе композиционными. Методика позволяет проводить мероприятия по весовой оптимизации брони.

Ключевые слова: композиционные материалы, бронезащита, комбинированные структуры, летательные аппараты, вооружение

Комбинированная многослойная бронеконструкция характеризуется наличием в её структуре разнотипных материалов, имеющих разную природу, характер энергопоглощения и разрушения от ударного воздействия. Для разработки защитных конструкций под требования заказчика необходимо проведение моделирования в конечно-элементных комплексах, натурные испытания тестовых образцов, а также выработка комплексных теоретических методик, позволяющих получать исходные толщины, геометрические и весовые параметры спроектированной бронеконструкции.

Одной из методик для разработки защитных конструкций является оценка энергопоглощения вплоть до разрушения различных материалов, применяемых в изделии.

Основываясь на допущениях о недеформируемости сердечников из термоупрочненной стали или карбида вольфрама, а также на принципе минимальной траектории поражающего элемента в объеме защитной панели, методика позволяет оценить остаточную энергию ударника после прохождения любого слоя по толщине брони, что позволяет спроектировать наиболее эффективную броневую защиту.

Энергетический анализ процесса взаимодействия пули и брони на основе текстильных материалов

Для поражающего элемента кинетическая энергия пули запишется в виде: $E_{кин} = \frac{m \cdot v_0^2}{2}$. Эта энергия при продвижении ударника в текстильной броне расходуется на следующие составляющие процессы пробития:

- 1) работа деформирования нитей при их растяжении $A_{деф}$,
- 2) работа сил трения при перемещении ткани в продольном направлении (вытягивание нитей) $A_{тр1}$,
- 3) работа сил трения при перемещении ткани в поперечном направлении (раздвигание нитей) $A_{тр2}$,
- 4) сообщение нитям ткани кинетической энергии $W_{кин}$,
- 5) работа разрушения и деформирования пули $A_{пули}$,
- 6) тепловые потери Q и др.

Поскольку при ударном взаимодействии часть слоёв оказывается пробитой, то работа деформирования нитей этих слоёв ткани преобразуется в работу их разрушения $A_{разр}$. Работа деформирования остальных слоёв ткани преобразовывается в работу растяжения нитей $W_{упр}$.

Закон сохранения механической энергии запишем в виде:

$$\Delta W_{пули} = \frac{m \cdot v_0^2}{2} - \frac{m \cdot v_1^2}{2} == A_{разр} + W_{упр} + A_{тр1} + A_{тр2} + A_{пули} + Q$$

Баллистическая энергоёмкость единичного слоя ткани $W_{БЭ1} = \frac{W_{БЭ}}{n}$, где n - число слоёв ткани в пакете, определяется свойствами ткани и скоростью удара кинетического элемента по пакету.

Аналитически можно выделить следующие компоненты энергоёмкости, включающие в себя: изменение скорости продольных волн за счет извитости пакета, эффективную площадь взаимодействия материала с пулей, деформативность

волокон, скорость продольной волны, поверхностную плотность ткани, диаметр поражающего элемента, число слоёв в пакете, скорость кинетического поражающего элемента.

Теоретическая формула для определения баллистической ёмкости:

$$W_{БЭ1} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \varepsilon_p^3 \cdot c^3 \cdot m_m \cdot d_n^2}{v_0}$$

где $\alpha = 0,75$ - коэффициент учета изменения скорости распространения продольных волн за счет извитости,

$\beta = 1..1,25$ - коэффициент вовлечения материала в работу под КПЭ,

$\gamma = 1 \cdot \varepsilon_p^{-1}$ - к-т пропорциональности, ε_p имеет размерность %/100,

c - скорость продольной волны в материале, определяемая по следующей формуле:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

где ρ - плотность материала, E - модуль упругости материала, m_m - поверхностная плотность слоя ткани, v_0 - скорость поражающего элемента перед преградой, d_n - диаметр пули.

Комплектуя в пакет n тканевых слоёв, получим следующую баллистическую энергоёмкость бронепакета:

$$W_{БЭ} = \frac{1,5 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot c^3 \cdot m_m \cdot d_n^2 \cdot n}{v_0}$$

Значение $W_{БЭ}$ характеризует энергию, которую поглощают пробитые тканевые элементы броневой защиты. Для определения минимального числа пробитых (сработавших) слоёв при поражении телом массы m , летящего со скоростью v_0 , необходимо выполнение неравенства:

$$W_{БЭ} \geq \frac{m \cdot v_0^2}{2}$$

Расчет баллистической энергоёмкости пакета сухой ткани

Введены следующие допущения:

- масса поражающего элемента не изменяется,
- диаметр поражающего элемента не меняется (не происходит расплющивания материала элемента, то есть не идет дополнительное вовлечение в работу материала

преграды из-за увеличения площади контакта непосредственно под поражающим элементом).

Методика решения:

1) выбирается материал для бронепанели:

Модуль упругости нити E , (Па), плотность материала ρ , ($\text{кг}/\text{м}^3$), поверхностная плотность m_m , ($\text{кг}/\text{м}^2$), деформативность нити ε_p , (%/100).

2) задаются характеристики кинетического поражающего элемента:

Масса M , (кг), скорость перед преградой v_0 , (м/с), диаметр d_n , (м).

3) определяется кинетическая энергия поражающего элемента, Дж:

$$E_{кин} = \frac{m \cdot v_0^2}{2}$$

4) определяется скорость волны в нити, м/с.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

5) определяется баллистическая энергоёмкость одного слоя непропитанной ткани, Дж:

$$W_{БЭ1} = \frac{1,5 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot c^3 \cdot m_m \cdot d_n^2}{v_0}$$

6) определяется необходимое количество слоёв баллистической ткани, при котором кинетическая энергия поражающего элемента поглощается бронепакетом:

$$n = \frac{E_{кин}}{W_{БЭ1}} = \frac{m \cdot v_0^2 \cdot v_0}{2 \cdot 1,5 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot c^3 \cdot m_m \cdot d_n^2} = \frac{m \cdot v_0^3}{3 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot c^3 \cdot m_m \cdot d_n^2}$$

7) необходимое количество слоёв n округляется в большую сторону до целого числа. К ним необходимо добавить деформативную подложку в виде параамидной ткани или баллистического нейлона в количестве 0.2 - 0.35 n .

При проектировании броневых панелей, включающих в себя тканые материалы различной природы и свойств (например, СВМ+Амос), кинетическая энергия поражающего элемента поглощается слоями последовательно, соответственно имеется возможность оценить с определенными допущениями скорость поражающего элемента после пробития каждого из слоёв.

Расчет баллистической энергоёмкости тканевой структуры, пропитанной связующим

Баллистическая энергоёмкость одного монослоя сухой ткани определяется по формуле:

$$W_{БЭ1} = \frac{1,5 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot c^3 \cdot m_m \cdot d_n^2}{v_0}$$

Как видно из приведенной формулы, энергоёмкость определяется скоростью распространения упругих волн в нитях тканевой основы, влияние же связующего проявляется именно в снижении скорости распространения волн и повышении поверхностной плотности материала.

Введем понятие объемной доли армирующего компонента в тканевом пропитанном монослое, обозначив его λ , тогда объемная доля смолы задастся в виде $1-\lambda$.

Масса волокон и связующего, вовлекаемых в работу при воздействии кинетического поражающего элемента, записывается по формуле:

$$M_{вол} = \rho_{вол} \cdot V_{вол} = \rho_{вол} \cdot \lambda \cdot V$$

$$M_{св} = \rho_{св} \cdot V_{св} = \rho_{св} \cdot (1 - \lambda) \cdot V$$

V - объем вовлекаемого материала преграды в рамках монослоя.

Линейную плотность нити, окруженную связующим, можно определить в виде формулы:

$$\rho_{нити} = \rho_{вол} (1 + \omega)$$

где ω - это массовая доля связующего относительно массы сухих нитей.

Скорость распространения продольной волны в нити, окруженной связующим, то есть находящейся в составе пластика, может быть найдена в соответствии со следующей формулой:

$$c_{нити} = \sqrt{\frac{E_{вол}}{\rho_{нити}}} = \sqrt{\frac{E_{вол}}{\rho_{вол} (1 + \omega)}} = \frac{c}{\sqrt{1 + \omega}}$$

Массовая доля связующего относительно массы сухих нитей определяется из следующих соотношений:

$$\omega = \frac{M_{св}}{M_{вол}} = \frac{\rho_{св} \cdot (1 - \lambda) \cdot V}{\rho_{вол} \cdot \lambda \cdot V} = \frac{\rho_{св} \cdot (1 - \lambda)}{\rho_{вол} \cdot \lambda}$$

скорость распространения волн в нитях:

$$c_{нити} = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{\rho_{св} \cdot (1 - \lambda)}{\rho_{вол} \cdot \lambda}}}$$

Тогда баллистическая стойкость одного монослоя пропитанной ткани определится по формуле:

$$W_{БЭ1} = \frac{1,5 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot c^3 \cdot m_m \cdot d_n^2}{v_0} = \frac{1,5 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot c^3 \cdot m_m \cdot d_n^2}{v_0 \sqrt{1 + \frac{\rho_{св} \cdot (1-\lambda)}{\rho_{вол} \cdot \lambda}}^3}$$

Методика расчета баллистической энергоёмкости пропитанных полимерным связующим монослоёв:

- 1) выбирается материал для основы пропитываемого монослоя:

Модуль упругости нити E , (Па), плотность материала ρ , ($\text{кг}/\text{м}^3$), поверхностная плотность m_m , ($\text{кг}/\text{м}^2$), деформативность нити ε_p , (%/100).

- 2) выбирается пропиточный материал:

- плотность материала ρ_c , ($\text{кг}/\text{м}^3$)

- 3) определяется объемная доля материала нитей и смолы:

- λ

- $1-\lambda$

- 4) задаются характеристики кинетического поражающего элемента:

масса M , (кг), скорость перед преградой v_0 , (м/с), диаметр d_n , (м).

- 5) определяется кинетическая энергия поражающего элемента перед бронебойной преградой, Дж:

$$E_{кин} = \frac{m \cdot v_0^2}{2}$$

- 6) определяется массовая доля связующего относительно массы сухих нитей:

$$\omega = \frac{\rho_{св} \cdot (1-\lambda)}{\rho_{вол} \cdot \lambda}$$

- 7) определяется скорость распространения продольной волны в сухой нити, м/с.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_г}}$$

- 8) определяется скорость распространения продольной волны в нити пропитанного монослоя:

$$c_{нити} = \frac{c}{\sqrt{1+\omega}}$$

- 9) определяется баллистическая энергоёмкость одного слоя пропитанной ткани, Дж:

$$W_{БЭ1} = \frac{1,5 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot c_{нити}^3 \cdot m_m \cdot d_n^2}{v_0}$$

10) определяется необходимое количество слоёв баллистической ткани, при котором кинетическая энергия поражающего элемента поглощается бронепакетом:

$$n = \frac{E_{кин}}{W_{БЭ1}} = \frac{m \cdot v_0^2 \cdot v_0}{2 \cdot 1,5 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot c_{нити}^3 \cdot m_m \cdot d_n^2} = \frac{m \cdot v_0^3}{3 \cdot \varepsilon_p^2 \cdot c_{нити}^3 \cdot m_m \cdot d_n^2}$$

Оценка поглощения энергии в металлической составляющей

Различают три типа пробивания металлических преград ударниками: выбивание пробки из преграды, пластическое деформирование преграды с радиальным течением материала, пластическое деформирование преграды с образованием тыльной выпучины и её разрушением по следующим типам: а) срезания пробки, б) образования лепестковой пробоины, в) пластического отгибания краев.

При пробивании преграды недеформируемым ударником в зависимости от соотношения толщины преграды b и диаметра ударника d_c реализуются следующие механизмы:

1) при $b > 1,17d_c$ срезанию пробки предшествует внедрение ударника в преграду на глубину $b - 1,17d_c$;

2) при $0,58d_c < b < 1,17d_c$ пробивание преграды осуществляется по механизму срезания пробки.;

3) при $b < 0,58d_c$ пробиванию преграды предшествует образование тыльной выпучины с последующим выбиванием пробки или проколом с образованием лепестков.

В таблице 1 приведены значения диаметров ударников патронов отечественного стрелкового вооружения различного калибра, наиболее часто используемый в локальных конфликтах для поражения летательных аппаратов различного назначения.

Таблица 1. Диаметры сердечников для патронов

№	Патрон	d_c , мм
1	7,62мм со Ст.Серд. 57-Н-134С	5,85
2	7,62мм обр.1943 с БЗ 57-БЗ-231	6,12
3	5,45мм с бронебойной пулей 7Н22	4,22
4	7,62 снайперский 7Н14	6,65

5	12,7мм Б-32 12,7x108	10,8
---	----------------------	------

Ниже представлены формулы для определения затрат энергии ударника на прохождение преград в соответствии с представленными выше механизмами пробития брони.

1) Работа внедрения сердечника на высоту $b - 1,17d_c$ равна:

$$A_1 = 2,7 \cdot \pi \cdot d_c^2 \cdot \sigma_{\text{мд.нр}} \cdot (b - 1,17d_c)$$

2) Работа срезания пробки:

$$A_2 = \frac{\pi \cdot b_n^2 \cdot \sigma_{\text{мд.нр}} \cdot d_c}{2\sqrt{3}}$$

3) Работа формирования выпучины:

$$A_3 = \frac{\pi}{8} \cdot \sigma_{\text{мд.нр}} \cdot d_c \cdot b \cdot (d_c + 2 \cdot \pi \cdot b)$$

4) Работа расширения отверстия по лепестковому пробую:

$$A_4 = 1,9 \cdot \sigma_{\text{мд.нр}} \cdot \frac{\pi \cdot d_c^2 \cdot b}{4}$$

$\sigma_{\text{мд.нр}}$ - предел текучести материала преграды

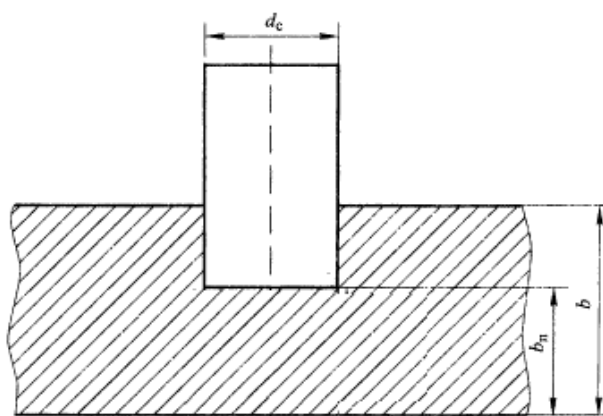


Рисунок 1 – Геометрия пробития металлической преграды

Таким образом, для определения типа пробития и выбора соответствующей формулы для описания работы ударника по пробитию бронеструктуры необходимо руководствоваться следующим порядком действий:

1) при $b > 1,17d_c$ работа пробития: $A = A_1 + A_2$

2) при $0,58d_c < b < 1,17d_c$ работа пробития: $A = A_2$

3) при $b < 0,58d_c$ работа пробития: $A = A_3 + A_4$

При компоновке слоистой броневой структуры с лицевым металлическим слоем кинетическая энергия поражающего элемента после прохождения листа оцениваются по следующей формуле:

$$E_{кин1} = \frac{m \cdot v_0^2}{2} - A$$

где A выбирается исходя из соотношения b и d_c .

При этом после прохождения лицевого листа, на котором произошло "срабатывание" пули, кинетический поражающий элемент имеет размеры, характеризующиеся диаметром сердечника d_c , однако предлагается часть массы оболочки пули присоединить к массе сердечника, повысив тем самым кинетическую энергию элемента.

Таким образом, на лицевом металлическом листе слоистой бронепреграды происходит потеря кинетической энергии, уменьшение диаметра поражающего элемента с d_n до сердечника d_c .

Анализ актуальности применения металлических материалов в конструкции комбинированной брони

Основными критериями энергоёмкости металлических элементов конструкции броневых элементов являются: толщина листа (отношение толщины к диаметру сердечника или же диаметру пули при отсутствии сердечника), предел текучести материала.

Соответственно направления повышения баллистической стойкости металлических бронелистов заключаются либо в повышении физико-механических свойств материалов, либо в использовании листов большой толщины, что позволит увеличить энергоёмкость преграды за счет включения механизмов внедрения ударника в преграду и выбивание пробки, являющихся наиболее энергоёмкими.

В то же время увеличение толщины неизбежно ведет к повышению веса броневой конструкции; одним из вариантов решения данного вопроса может быть использование броневых алюминиевых и титановых листов.

Энергопоглощение в керамических элементах

Будем считать, что основную роль в разрушении материала играет упругая энергия, накопленная в объеме при его деформировании до исчерпания упругих свойств.

$$W_y = \frac{\sigma_k^2 \cdot V}{2 \cdot E}$$

σ_k - предел упругости керамики,

E - модуль Юнга,

V - объем вовлеченного в разрушение материала.

Будем считать соотношение входного и выходного отверстий от кинетического поражающего элемента равным 1 к 2, то есть по механизму конусного раскрытия пробойны.

Тогда при толщине керамической плитки H объем вовлеченного материала определится по формуле:

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{3} \pi H (R_1^2 + R_2^2 + R_1 R_2) = \frac{1}{3} \pi H (R_1^2 + 4R_1^2 + R_1 \cdot 2R_1) = \frac{1}{3} \pi H (7R_1^2) = \frac{1}{3} \pi H \left(\frac{7d^2}{4} \right) \\ &= \frac{7}{12} \pi H d^2 \end{aligned}$$

Тогда энергия разрушаемого объема составит:

$$W_y = \frac{\sigma_k^2 \cdot \frac{7}{12} \pi H d^2}{2 \cdot E} = \frac{7 \sigma_k^2 \cdot \pi H d^2}{24 \cdot E}$$

На значение диссипации энергии в керамике большое влияние оказывает её толщина и жесткость материала подложки, а также методы удерживания осколков керамической плиты путем оклейки её сухими и пропитанными тканями.

Выводы

Предлагаемый подход к проектированию комбинированных структур для защиты летательных аппаратов от стрелкового вооружения позволяет применять большое

количество видов материалов, различных по своей природе и характеру разрушения, при этом обеспечивается возможность весовой оптимизации конструкции, а также, при соответствующем дополнении - и стоимостной оценки разработок.

Библиографический список

1. Дудченко А.А., Елпатьевский А.Н., Лурье С.А., Фирсанов В.В. «Анизотропные панели – плоская задача: Учеб.пособие» - М.: Изд-во МАИ, 1991. – 96с.
2. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др. "Высокоскоростное взаимодействие тел" - Изд-во СО РАН, 1999.
3. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н. "Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования", М.: Радиософт, 2008. - 406с.
4. Маринин В.М., Хромушин В.А. "Определение характеристик энергоёмкости защитных конструкций на основе текстильной брони при баллистическом ударе". Экстремальное состояние вещества. Детонация, Ударные волны - Труды международной конференции "VII Харитоновские тематические научные чтения" - Саров; РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005.