

Полимерная композитная броня

Композиционные материалы (КМ) – многокомпонентные материалы, состоящие из сплошной основы (матрицы, связующего) и дискретного армирующего материала. Путем подбора состава и свойств армирующего материала и связующего получают композиционные материалы с необходимым сочетанием физико-механических, эксплуатационных и технологических свойств. Обычно армирующий материал определяет прочностные свойства КМ, а матрица обеспечивает монолитность материала и его сдвиговую прочность, превращает дискретный армирующий материал в единую механическую систему, способствует равномерному распределению напряжений. По структуре композиционные материалы делятся на несколько основных классов: волокнистые (армированы волокнами, нитями, нитевидными кристаллами), слоистые (армированы слоями ткани, пленками, пластинками и другими слоистыми материалами), дисперсно-упрочненные (армированы материалами в виде дисперсных частиц с размерами 0,1 ... 100 мкм) и нанокомпозиты (в их состав входят наночастицы размерами 10 ... 100 нм).

В защитных структурах СИБ применяют все перечисленные классы КМ. Но наибольшее распространение получили КМ, у которых в качестве связующего используются полимерные материалы, а в качестве армирующего материала – нити, жгуты, ткани или нетканые слоистые структуры из синтетических высокомодульных высокопрочных параарамидных или полиэтиленовых волокон. Такие КМ относятся к группе волокнистых или слоистых КМ, сокращенно их называют органопластиками. Органопластики применяются для изготовления шлемов и энергоемких жестких подложек комбинированной, например, керамико-органопластиковой многослойной брони.

Полимерные связующие материалы делятся на два основных класса: терморезактивные и термопластичные. Первые представляют собой вязкие жидкости (при температуре переработки), которые после пропитки армирующего материала и формообразующих технологических операций за счет химических реакций: полимеризации превращаются в неплавкую твердую полимерную матрицу. Этот химический процесс, который, как правило, идет при повышенной температуре, называется отверждением. В качестве терморезактивных связующих традиционно используют такие полимеры, как эпоксидные олигомеры, ненасыщенные полиэфиры,

мочевина- и фенолформаль-дегидные системы, олигоимиды и другие термореактивные сетчатые полиме-ры. Их основные преимущества: низкая стоимость и хорошие технологические свойства, к недостаткам термопластичных связующих следует отнести хруп-кость и низкую сопротивляемость ударным нагрузкам. Для сведения к ми-нимуму этих недостатков при создании защитных структур СИБ в состав термореактивных связующих вводят пластификаторы, например поливинилбутираль.

Термопластичные полимеры в исходном состоянии находятся в твердом состоянии, а при повышении температуры могут многократно переходить в жидкое состояние, пропитывать армирующий материал и при охлаждении образовывать достаточно прочный КМ. В качестве термопластичных связующих используют следующие полимеры: полиуретаны, полиэтилен, полипропилен, фторопласты, ПВХ, полиамиды и другие термопластичные полимеры.

Главным преимуществом армированных термопластов с точки зрения использования их в СИБ является сочетание. высокой прочности с высокой ударной вязкостью и трещиностойкостью. Широкому распространению органопластиков с термопластичным связующим мешает высокая вязкость расплавов полимеров, из-за чего приходится работать с высокими давлениями и температурами. Для преодоления этих трудностей предложены разные способы, например, волоконная и пленочные технологии. Из связующего сначала получают либо волокна, которые смешивают с волокнами армирующего материала или вводят в состав тканей, либо пленки, которые выкладывают в формообразующую матрицу или наматывают поочередно с лентой или тканью из армирующего материала. После этого полученный пакет или изделие прессуют при высокой температуре - связующее расплавляется и проникает между нитями и волокнами, превращаясь при остывании в полимерную матрицу.

Чтобы устранить недостатки каждого из классов связующих и добиться оптимального сочетания свойств применяют различные смеси полимеров. Введение каучуков в эпоксидные и другие хрупкие термореактивные связу-ющие повышает вязкость разрушения и ударную прочность композитов и несколько снижает предел прочности и модуль упругости КМ. К тем же эффектам приводит модификация термореактивных связующих термопла-стами. Эпоксидные олигомеры снижают вязкость, улучшают технологичность термопластов.

Несмотря на то что полимерные органопластики по сравнению с другими КМ характеризуются высокими прочностными показателями, их модуль упругости существенно (в 3-5 раз) ниже, чем у армирующих нитей, особенно у органопластиков на основе тканей. Данное обстоятельство приводит к уменьшению продольной скорости звука в органопластиках примерно в 2 раза.

Модуль упругости $E_{оп}$ и предел прочности $\sigma_{оп}$ органопластиков приближенно могут быть определены по так называемым смесевым формулам:

$$E_{оп} = \alpha v_B E_B + v_{св} E_{св},$$

$$\sigma_{оп} = \alpha v_B \sigma_B + v_{св} \sigma_{св},$$

где v_B , $v_{св}$ - объемное содержание в композите соответственно волокон или нитей и связки; E_B , $E_{св}$, σ_B , $\sigma_{св}$ - соответственно их модули упругости и пределы прочности; α - коэффициент, зависящий от расположения волокон или нитей: при однонаправленном расположении $\alpha = 1$, при двунаправленном ортогональном $\alpha = 0,5$, при случайном расположении $\alpha \approx 3/8$.

Баллистическая стойкость органопластиковой брони существенно ниже баллистической стойкости ее текстильной основы. При содержании связующего свыше 40% v_{50} уменьшается более чем в 2 раза, в то время как сдвиговая прочность достигает максимума. Наличие связующего ослабляет защитные свойства текстильной брони, во-первых, вследствие уменьшения подвижности нитей как в поперечном, так и продольном направлениях и, во-вторых, вследствие уменьшения скорости распространения в них продольных волн.

Отсутствие подвижности нитей приводит к тому, что изменяется механизм взаимодействия пули с броней - сила торможения пули образуется не из-за сложения сил натяжения нитей, проходящих через область воздействия, а ввиду инерционного и прочностного сопротивлений проникания пули в органопластиковую преграду или среза преграды по периферии области воздействия, как это происходит при воздействии пуль на металлические преграды. При таком механизме взаимодействия баллистическая стойкость определяется в основном твердостью и сдвиговой прочностью материала преграды и в меньшей степени прочностью армирующих нитей на растяжение. Невысокая скорость звука в КМ препятствует рассредоточению энергии удара на больший объем материала преграды, что дополнительно уменьшает ее баллистическую

стойкость. Тем не менее баллистическая стойкость органопластиков к ударно-проникающему воздействию имитатора осколков (стального шарика массой 1,1г) остается достаточно высокой, что и определяет ее использование в защитных структурах СИБ.

При относительно небольшом содержании связки баллистическая стойкость органопластиковой преграды определяется способностью ее текстильной основы преобразовывать кинетическую энергию ударника в упругую энергию растяжения нитей без их разрушения. Максимальная упругая энергия W_y , которая может быть запасена текстильной основой, равна упругой энергии деформированного объема V_d при достижении нитями деформации разрушения $W_y = \frac{E\varepsilon_p^2}{2}V_d$, где E – упругий модуль растяжения нитей. В соответствии с энергетической концепцией влияние связующего на баллистическую стойкость органопластиковых преград проявляется через уменьшение деформированного объема V_d вследствие уменьшения скорости распространения упругих продольных и поперечных волн в нитях, окруженных связующим материалом.

Формула для предельной скорости пробития текстильного бронепакета:

$$v_{п.с.п} = Kc\varepsilon_p \left(\frac{m_{т.п} d_n^2}{m} \right)^{1/3}$$

где K – коэффициент, характеризующий свойства ткани и геометрию ее деформирования; c – скорость распространения продольных волн в нитях ткани; $m_{т.п}$ – поверхностная плотность текстильного бронепакета; d_n , m – диаметр и масса ударника. Для того чтобы применить эту формулу для вычисления предельной скорости пробития органопластиковых преград, необходимо знать зависимость скорости звука в нитях c_n от содержания связующего материала.

Как известно, скорость c распространения упругих волн в нитях определяется отношением модуля упругости нити к ее плотности $c_n = \sqrt{E/\rho_n}$. В связи с тем, что модуль упругости СВМ нитей многократно превосходит модуль упругости связующего материала, можно считать, что модуль упругости нитей в составе органопластиковой преграды практически не зависит от содержания связки. В то же время связующий материал, прочно скрепленный с нитями, увеличивает линейную плотность нитей, что приводит к уменьшению скорости распространения волн в нитях вследствие увеличения их инерции. Линейную плотность нити ρ_n , окруженной связующим материалом, можно вычислить с

помощью соотношения $\rho_n = \rho_m(1 + \xi)$, где ρ_m – плотность материала волокон; ξ – массовая доля связки(относительно массы сухой нити). Тогда скорость c_n распространения продольных волн в нитях в составе органопластиковой преграды может быть определена с помощью зависимости

$$c_n = \sqrt{\frac{E}{\rho_n}} = \sqrt{\frac{E}{\rho_m(1+\xi)}} = \frac{c}{\sqrt{1+\xi}}$$

Эта зависимость остается справедливой при относительно небольшом содержании в КМ связующего материала $\xi < 0,2$. При большем содержании связки ее влияние на скорость распространения упругих волн, по-видимому, уже не будет сказываться столь сильно. Поэтому в зависимость для определения скорости продольных волн в нитях в составе органопластиковых преград следует подставлять некоторое эффективное значение $\xi_{эф} = k\xi$, где коэффициент $k < 1$ учитывает уменьшение влияния содержания связки при значениях ξ больших 0,2.

Зависимость для вычисления предельной скорости пробития органопластиковой преграды $v_{п.с.п}^{оп}$ будет иметь вид

$$v_{п.с.п}^{оп} = \frac{v_{п.с.п}^{т.п}}{\sqrt{1 + k\xi}} \frac{\varepsilon_p^{оп}}{\varepsilon_p^{т.п}},$$

где $v_{п.с.п}^{т.п}$ – предельная скорость пробития текстильной основы органопластиковой преграды; $\varepsilon_p^{оп} \varepsilon_p^{т.п}$ – предельные деформации удлинения нитей в составе органопластиковой преграды и текстильного бронепакета. Баллистическая стойкость органопластиковой брони ниже стойкости ее текстильной основы. Однако это справедливо лишь при относительно малой поверхностной плотности органопластиковой преграды. Но уже при отношении массы преграды под ударником к массе ударника

$$X = \left(\frac{m_{т.п} d_{п}^2}{m}\right) \geq 0,4$$

баллистическая стойкость органопластиковых преград начинает превосходить стойкость их текстильной основы. Потеря нитями подвижности и уменьшение скорости распространения продольных волн компенсируется увеличивающей изгибной жесткостью и сдвиговой прочностью органопластиковых преград. Соответствующая зависимость для вычисления предельной скорости пробития имеет вид

$$\nu_{\text{п.с.п}}^{\text{о.п}} = \nu_{\text{п.с.п}}^{\text{т.п}} \sqrt{\frac{1 + \xi(\beta X)^3}{1 + \xi}}$$

Применяемая в СИБ органопластиковая броня по необходимости должна обладать минимальной поверхностной плотностью, а ее структура для сохранения приемлемой баллистической стойкости должна обеспечивать определенную подвижность нитей. Наиболее просто этого можно добиться путем уменьшения содержания связующего в КМ, не допуская пропитывания нитей. Но одновременно с этим уменьшаются изгибная жесткость и сдвиговая прочность органопластика, которые необходимы для обеспечения конструкционной прочности силовой оболочки бронешлема или жесткой подложки для керамики. Удовлетворительный компромисс достигается различными технологическими приемами изготовления органопластиковых бронепанелей и шлемов.

Бронепакеты из разного числа слоев ткани пропитываются различными связующими, отличающимися вязкостью и прочностью адгезионного сцепления слоев ткани. Оптимальная прочность сцепления составляет 40...60 Н/см. Баллистическая стойкость органопластика возрастает с увеличением вязкости связующего и достигает максимального стационарного значения при вязкости большей 8000 Н/см

Маловязкое связующее легко пропитывает ткань, заполняет межволоконные капилляры и при затвердевании практически полностью исключает подвижность волокон и нитей. Наоборот, вязкое связующее, находясь на поверхности ткани, оставляет внутренние волокна нитей не связанными, что в определенной степени позволяет включить в силу торможения пули натяжение нитей, обладающих некоторой подвижностью. Данное обстоятельство способствует увеличению баллистической стойкости органопластика.

Особое место среди баллистических органопластиков занимают бронепанели и бронешлемы, изготовленные на основе высокопрочных высокомодульных волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Эти волокна в отличие от арамидных не перерабатываются в ткани методом текстильных операций, а формуются в виде специальных листов, представляющих собой структуру из двух однонаправленных слоев некрученной нити, развернутых друг относительно друга под прямым углом и фиксируемых с помощью связующего. В качестве связующего при формовании полиэтиленовых защитных бронезащитных элементов используют

полимеры, обладающие адгезией к полиэтилену - полиизобутилен, бутилкаучуки и др. Данная технология, разработанная голландской фирмой DSM, получила название «Шилд», а полиэтиленовые материалы, производимые по такой технологии, известны под торговым названием «Спектра Шилд». Эластичность используемых связующих обеспечивает некоторую подвижность нитей - позволяет им вытягиваться из бронепанели и изгибаться вдоль направления воздействия, т.е. включать энергоемкий механизм торможения пуля натяжением нитей. Отсутствие операции ткачества позволяет исключить повреждение волокон в процессе ударного уплотнения ткани. Необходимо отметить, что по технологии «Шилд» можно перерабатывать и другие высокопрочные волокна.

Еще один тип связующего, который используют при производстве структурно одномерных композитов Дайнема UD, это обычная полиэтиленовая пленка. Методом прессования полотен Дайнема UD с содержанием 25 % полиэтиленового связующего изготавливают бронезащитные элементы 2-го класса защиты с поверхностной плотностью 6,9 кг/м². Поверхностная плотность полиэтиленовых пластин, останавливающих пулю из автомата АК-74, - 16 кг/м², а пулю из винтовки СВД – 17 кг/м².