

МНОГОСЛОЙНАЯ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩАЯ ПОДЛОЖКА ДЛЯ ДВУХСЛОЙНЫХ ПРЕГРАД С ВНЕШНИМ КЕРАМИЧЕСКИМ СЛОЕМ

П.Г. ПЕТРОСЯН*, Л.Н. ГРИГОРЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

*e-mail: ppetros@ysu.am

(Поступила в редакцию 14 февраля 2024 г.)

Предложен новый тип многослойной энергопоглощающей подложки, слои которой связаны между собой эластичным клеем. Показано, что при столкновении ударника с преградой часть кинетической энергии ударника расходуется на смещение отдельных слоев подложки друг относительно друга, что приводит к увеличению предельной скорости пробития преграды. Исследована зависимость предельной скорости пробития преграды от величины смещения слоев подложки, а также зависимость энергии, затрачиваемой на скольжение слоев, от площади деформированной части подложки. Показано, что при одинаковой энергии ударника глубина деформации предложенной подложки в 1.5 раза меньше по сравнению с подложками, в которых скольжение слоев отсутствует. Применение предложенной подложки в керамических защитных структурах позволяет существенно снизить поверхностную плотность конструкции.

1. Введение

В последние годы для защиты личного состава используются защитные конструкции, состоящие из наружного керамического слоя и внутренней энергопоглощающей подложки [1–3]. Эффективность таких конструкций в защите от высокоэнергетических и твердосплавных пуль обусловлена высокой твердостью используемого керамического материала. В качестве керамики в основном используются Al_2O_3 , SiC и B_4C . Эти материалы, имеющие высокую твердость, при столкновении с ударником могут деформировать и разрушать его. Однако они достаточно хрупки и поэтому не могут быть надежным защитным слоем без энергопоглощающей подложки [1, 2].

Когда ударник сталкивается с керамическим слоем, ударник и керамический слой деформируются и частично разрушаются. Осколки разрушенного ударника и керамического слоя движутся к подложке с довольно большой кинетической энергией и, деформируя подложку, вбиваются в нее. В современных защитных конструкциях в качестве подложки используются материалы из высокопрочных синтетических волокон [1–6]. Их модуль упругости и предел прочности при растяжении очень высоки, а относительное удлинение волокна при разрыве невелико. Такими уникальными свойствами обладают арамидные волокно (кевлар) и сверхвысокомолекулярный полиэтилен [4–6]. Роль подложки заключается в пре-

образовании кинетической энергии осколков в потенциальную энергию деформации подложки. На деформацию подложки, как показывают расчеты, тратится около 40% кинетической энергии ударника [7, 8], следовательно, роль подложки в повышении баллистической устойчивости двухслойной преграды очень важна.

В работе [7] представлены различные модели и подходы для анализа высокоскоростного проникновения ударника через барьер, и приводятся аналитические выражения для расчета предельной скорости пробития двухслойных преград. В работе [8] при расчете предельной скорости пробития преграды учтены затраты энергии на разрушение ударника и керамики. Когда ударник встречается с керамическим слоем, проникновение ударника в керамику происходит в течение определенного периода времени (время задержки). За это время ударник деформируется и часть ударника разрушается. Деформируется также керамический слой, и в керамике образуется деформированный участок в виде усеченного конуса. После образования усеченного конуса неразрушенная часть ударника, усеченный конус и часть подложки, находящаяся под основанием конуса, двигаются с одинаковой скоростью. Кинетическая энергия движущихся частей, упомянутая выше, преобразуется в потенциальную энергию деформации подложки.

С учетом параметров, характеризующих механические свойства компонентов двухслойной преграды и ударника, в работе [8] получено следующее выражение для предельной скорости пробития преграды:

$$V = \sqrt{\frac{(M_{ud1} + M_k + m_p)E_n \epsilon_p^2 \beta_s^2 V_p (1 - \lambda)}{2 M_{ud}^2}} + \sqrt{\frac{2}{M_{ud}} (\xi_{ud} \sigma_{ud} \epsilon_{ud} \Delta V_{ud} + \frac{\xi_k \sigma}{2E} V_k)}, \quad (1)$$

где M_{ud} – начальная масса ударника, M_{ud1} – масса ударника после разрушения при ударе, M_k и m_p – масса керамики и подложки, E_n – модуль упругости растяжения нитей, ϵ_p – предельная деформация подложки, β_s – увеличение диаметра деформируемой части подложки (эксперимент показывает, что диаметр деформируемой части подложки больше, чем диаметр большого основания усеченного конуса, который опирается на подложку), V_p – объем деформируемой части подложки, λ – объемная доля связующего материала в подложке, ξ_{ud} – коэффициент, учитывающий неоднородность деформации ударника, σ_{ud} и ϵ_{ud} – предел прочности ударника и его предельная деформация, ΔV_{ud} – объем разрушившейся части ударника, ξ_k – коэффициент неоднородности деформации керамики, σ – предел прочности керамики на сжатие, V_k – объем разрушенного керамического конуса, E – модуль упругости керамики.

Подложки, содержащие слои волокнистого материала, изготавливают с использованием прессов высокого давления. В многослойных композитных подложках различные волокнистые ткани склеиваются клеем на основе твердой смолы (чаще всего эпоксидной) [9]. В таких подложках отдельные слои подложки очень жестко связаны друг с другом, и при деформации отклонение (скольжение) отдельных ее слоев относительно друг друга незначительно.

Мы предлагаем модель энергопоглощающей подложки, в которой слои при деформации могут скользить относительно друг друга [10]. Настоящая работа посвящена исследованию энергопоглощающих свойств многослойной подложки нового типа, слои которой приклеены друг к другу эластичным клеем.

2. Модель многослойной энергопоглощающей подложки

В многослойной подложке, слои которой приклеены друг к другу эластичным клеем, при столкновении ударника с преградой кинетическая энергия неразрушенной части ударника и усеченного керамического конуса расходуется не только на деформацию подложки, но и на смещение отдельных слоев относительно друг друга. В результате уменьшается величина деформации волокна и вероятность его обрыва, что в свою очередь приводит к увеличению предельной скорости пробития керамической преграды.

Для оценки энергии, затрачиваемой на смещение слоев при ударе, были приготовлены образцы, состоящие из трех слоев кевлара. Они были склеены между собой эластичным клеем «Наирит», который представляет собой раствор полихлоропренового каучука в органических растворителях. Два внешних слоя одним концом жестко прикреплены друг к другу, а средний слой прикреплен к внешним слоям клеем «Наирит», имеет свободный конец и может растягиваться за счет приложения внешней силы. С целью изучения зависимости коэффициента упругости образцов от площади склеиваемой поверхности были приготовлены образцы с различными склеенными площадями. Коэффициент упругости был определен с помощью устройства Лермонтова. Оно позволяет с высокой точностью измерить абсолютное удлинение испытуемого образца. На рис. 1 представлена зависимость силы упругости, возникшей в результате растяжения, от абсолютного удлинения для нескольких образцов с разными склеенными площадями. Как видно из рис. 1, эти зависимости в исследуемом диапазоне достаточно близки к линейным, что позволяет определить коэффициенты упругости образцов. Отметим, что приложенные силы были выбраны такими, что остаточная деформация практически отсутствовала.

На рис.2 представлена зависимость коэффициента упругости от склеенной площади образцов. Из этой зависимости был определен коэффициент упругости на единицу склеенной площади, который составляет $k_0 = 3.47 \times 10^9 \text{ Н/м}^3$.

Таким образом, если учесть, что отдельные слои в подложке не закреплены жестко и могут скользить друг относительно друга при деформации, и предста-

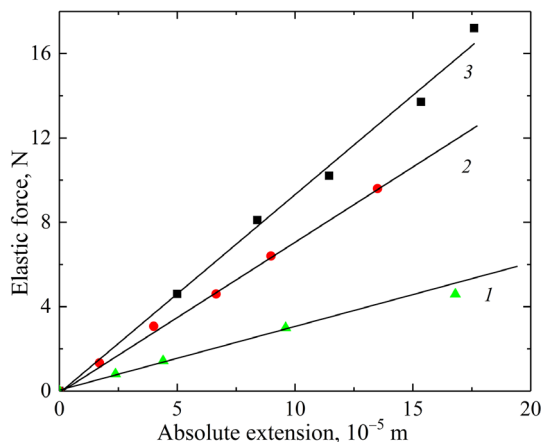


Рис.1. Зависимость силы упругости от абсолютного удлинения для образцов с разными площадями: 1 – 9.6, 2 – 19.2 и 3 – 28.8 см^2 .

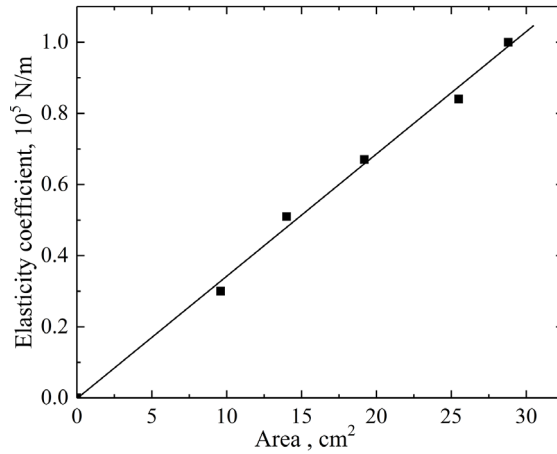


Рис.2. Зависимость коэффициента упругости от площади образцов.

вить подложку как систему, составленную из параллельно соединенных «пружин» с одинаковыми коэффициентами упругости, то приведенный коэффициент упругости подложки можно определить по формуле $k = k_0 SN$, где S – площадь подложки, N – число слоев.

Затрачиваемая энергия на деформацию подложки, когда слои в подложке жёстко прикреплены, определяется по формуле [8]:

$$W = \frac{E_n \varepsilon_p^2 \beta_s^2 V_p (1-\lambda)}{2}. \quad (2)$$

Если учесть скольжение отдельных слоев, то на скольжение затрачивается дополнительная энергия, которую в линейном приближении приблизительно можно оценить как $k_0 SN x^2 / 2$, где x – среднее отклонение слоев относительно друг друга. Учитывая затрачиваемую энергию на скольжение слоев для полной энергии деформации подложки, получаем:

$$W = \frac{E_n \varepsilon_p^2 \beta_s^2 V_p (1-\lambda)}{2} + \frac{k_0 SN}{2} x^2. \quad (3)$$

С учетом вышеизложенного, формула (1) для предельной скорости пробития примет следующий вид:

$$V = \sqrt{\frac{(M_{ud1} + M_k + m_p)[E_n \varepsilon_p^2 \beta_s^2 V_p (1-\lambda) + k_0 SN x^2]}{2M_{ud}^2}} + \sqrt{\frac{2}{M_{ud}} (\xi_{ud} \sigma_{ud} \varepsilon_{ud} \Delta V_{ud} + \frac{\xi_k \sigma^2}{2E} V_k)}. \quad (4)$$

Важной характеристикой двухслойных защитных конструкций является поверхностная плотность q – масса защитной структуры единичной площади поверхности:

$$q = \rho_k h + \rho_p \delta,$$

где ρ_k – плотность керамики, ρ_p – плотность подложки, h – толщина керамического слоя, δ – толщина подложки.

На рис. 3 представлена зависимость предельной скорости пробития от толщины подложки для поверхностной плотности преграды $q = 50$ кг/м² с керамическим слоем Al_2O_3 при площади подложки $S = 5 \times 10^{-2}$ м² и количестве слоёв в подложке $N = 40$. Величины, представленные в формуле (4), характеризующие механические свойства компонентов двухслойной преграды и ударника, соответствуют величинам, взятым в работе [8].

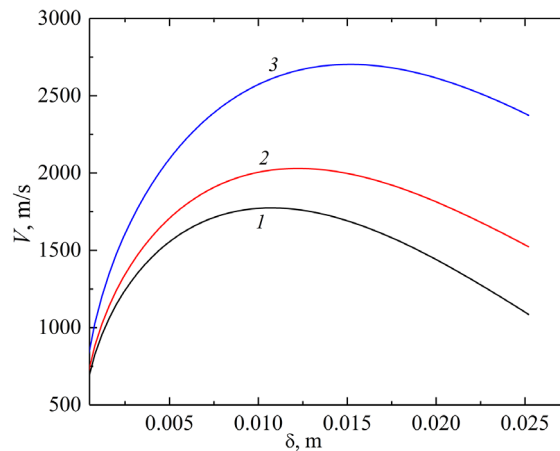


Рис.3. Зависимость предельной скорости пробития от толщины подложки: 1 – $x = 0$, без скольжения слоев в подложке; 2 – $x = 0.5$ и 3 – $x = 1$ мм.

Как видно, при $x = 0$ максимальное значение предельной скорости пробития составляет около 1750 м/с. Если считать, что среднее смещение отдельных слоев относительно друг друга составляет $x = 0.5$ мм, то максимальное значение предельной скорости пробития достигает значения 2000 м/с, что на 14% больше, чем в случае отсутствия скольжения слоев в подложке, а при $x = 1$ мм увеличение составляет 57%. Увеличение максимального значения предельной скорости пробития означает, что энергия, затрачиваемая на деформацию подложки, уменьшается, так как часть энергии затрачивается на скольжение слоев.

Для определения отношения толщины подложки к толщине керамического слоя при заданной поверхностной плотности преграды построена зависимость предельной скорости пробития от относительной толщины преграды $h^* = h/(h + \delta)$ (рис. 4). Из полученных зависимостей можно определить, какая должна быть толщина керамического слоя, чтобы предельная скорость пробития приняла максимальное значение при данной поверхностной плотности защитной структуры. Когда скольжение между слоями отсутствует ($x = 0$), как видно из рис.4, предельная скорость пробития достигает своего максимального значения

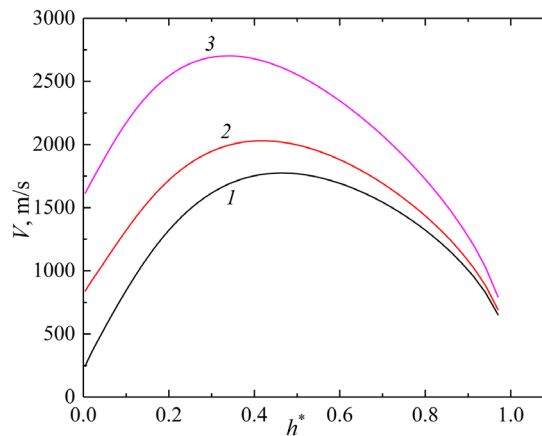


Рис.4. Зависимость предельной скорости пробития от относительной толщины двухслойной преграды: 1 – $x = 0$; 2 – $x = 0.5$ и 3 – $x = 1$ мм.

при величине относительной толщины $h^* = 0.462$, при этом $\delta/h = 1.16$, т. е. толщина керамического слоя должна быть в 1.16 раза меньше толщины подложки. Когда $x = 0.5$ мм, $h^* = 0.415$, $\delta/h = 1.42$ толщина керамического слоя должна быть в 1.42 раза меньше толщины подложки, а при $x = 1$ мм, $h^* = 0.338$, $\delta/h = 1.96$ толщина керамического слоя должна быть почти в два раза меньше толщины подложки.

Для того, чтобы проверить достоверность наших рассуждений, были изготовлены преграды двух типов. В первой двухслойной преграде подложкой являлся прессованный кевлар, слои которого жестко прикреплены друг к другу, а во второй – слои кевлара были приклеены друг к другу эластичным клеем. В обоих случаях внешним керамическим слоем была корундовая керамика Al_2O_3 . Толщина и вес подложек были одинаковы. В испытаниях использовался стальной ударник, характеристики которого сопоставимы с характеристиками стальных сердечников бронебойных пуль калибра 7.62 мм, кинетическая энергия которых составляет 3200–3500 Дж.

При толщине керамики 10 мм обе преграды выдерживают удар, однако, когда сравниваем площади послеударной деформации на обратной стороне подложки, то видим, что для подложек второго типа площадь деформации примерно на 20% больше, а глубина деформации в 1.5 раза меньше, чем у подложек первого типа. Большую площадь деформации в подложках второго типа мы связываем со скольжением слоев относительно друг друга, а меньшая глубина деформации указывает на то, что при ударе на деформацию подложки затрачивается значительно меньшая энергия, чем в случае отсутствия скольжения. Испытания также показывают, что при уменьшении толщины керамического слоя до 8 мм двухслойная преграда первого типа пробивается, а преграда второго типа, где слои скреплены эластичным клеем, не пробивается.

Если оценить энергию, затрачиваемую на деформацию подложки по формуле (2), она составляет примерно 1260 Дж, а энергия, затрачиваемая на скольжение слоёв в подложках с площадью $S = 5 \times 10^{-2} \text{ м}^2$ и количеством слоев $N = 40$, составляет примерно 870 Дж при среднем отклонении слоев в подложке $x = 0.5$ мм. При проведении оценок предполагалось, что коэффициент упругости постоянен при таких отклонениях слоев в подложке. Столь большое значение энергии получается в том случае, если слои в подложке смещены друг относительно друга по всей поверхности. При оценке энергии, затрачиваемой на скольжение слоев, скорее всего, следует брать не всю площадь подложки, а только площадь деформированной части подложки. Экспериментально показано, что деформированная часть в противоположной стороне подложки представляет собой полушару диаметром около 10 см.

На рис.5 представлена зависимость W/W_0 от S/S_0 , где W – энергия, затрачиваемая на скольжение слоев в подложке, W_0 – полная энергия деформации при отсутствии скольжения слоев, S – площадь деформированной части подложки, S_0 – полная площадь подложки. Эта зависимость позволяет рассчитать часть энергии, затрачиваемой на скольжение при разных площадях деформированной части подложки. Когда площадь деформированной части подложки равна 10% полной площади подложки при среднем отклонении слоев $x = 0.8$ мм, энергия, затрачиваемая на отклонение слоев, составляет 17% от общей энергии деформации подложки, а при 20% она достигает 35%.

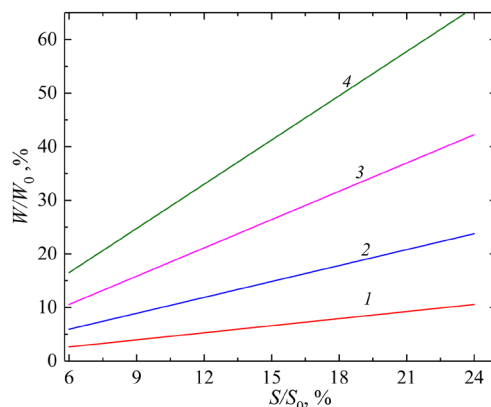


Рис.5. Зависимость W/W_0 от S/S_0 : 1 – $x = 0.4$, 2 – $x = 0.6$, 3 – $x = 0.8$ и 4 – $x = 1$ мм.

Время взаимодействия ударника с преградой составляет несколько десятков микросекунд, поэтому при оценке энергии, затрачиваемой на отклонение слоев, следует использовать динамические параметры упругости подложки, которые могут существенно отличаться от соответствующих статических параметров [11]. Хотя сделанные оценки носят приблизительный характер, однако экспериментально установлено, что подложки из слоев, соединенных между собой эластичным клеем, могут обеспечить тот же класс защиты при меньшей толщине керамического слоя. Это позволяет существенно снизить вес защитных конструкций.

3. Заключение

Предложена модель многослойной энергопоглощающей подложки для керамических защитных конструкций. Исследована энергопоглощающая способность предложенной подложки. Оценена энергия, затрачиваемая на смещение слоев при ударе в зависимости от площади деформированной части подложки и от величины среднего смещения слоев. Показано, что энергия, затрачиваемая на скольжение слоев может составлять от 10 до 40% от общей энергии деформации подложки, что приводит к увеличению предельной скорости пробития двухслойной керамической преграды. Защитные конструкции на основе предложенной подложки могут обеспечить тот же класс защиты при меньшей толщине керамического слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Бхатнагар. Легкие баллистические материалы. Москва, Техносфера, 2011.
2. И.Ф. Кобилкин, В.В. Селиванов. Материалы и структуры легкой бронезащиты. Москва, Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014.
3. S. Daddamani, S.M. Kulkarni, S. Joladarashi, T.Kumar, A.Gurjar. International J. Lightweight Materials and Manufacture, **6**, 450 (2023).
4. D.F. Adams, R.S. Zimmerman, H.W. Chang. SAMPE Journal, **21**, 5, 44 (1985).
5. F. Slone, J. Nguyen. J. Composite Materials, **29**, 16, 2092 (1995).
6. W. Walter, B. Scott. Proc. of the 22nd SAMPE Int. Tech. Conf., 1078–1091(1990).

7. **G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. Elperin.** High Speed Penetration Dynamics: Engineering Models and Methods. Singapore, World Scientific Publ., 2013.
8. **И.Ф. Кобылкин.** Физика горения и взрыва, **53**, 4, 126 (2017).
9. **S. Kumar, D. Gupta, I.Singh, A. Sharma.** J. Reinf. Plast. Compos, **29**, 2048 (2010).
10. **L. Grigoryan, P. Petrosyan.** Armenian patent № 806 Y. A Multilayer Composite Substrate for Armor Plates and a Method for its Fabrication, (2023).
11. **А. Слуцкер, О. Мирзоев.** ФТТ, **38**, 5, 1547 (1996).

ԿԵՐԱՄԻԿԱԿԱՆ ՊԱՇՏՊԱՆԻՉ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԱՄԱՐ
ԲԱԶՄԱՇԵՐՏ ԷՆԵՐԳԱԿԼԱՆԻՉ ՏԱԿԴԻՐ

Պ.Գ.ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Լ.Ն. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ

Առաջարկվել է նոր տեսակի բազմաշերտ էներգակլանիչ տակդիր, որի շերտերը իրար են միացված առաձգական սուսինձով: Ցույց է տրված, որ երբ հարվածող գնդակը բախվում է պաշտպանիչ կառուցվածքին նրա կինետիկ էներգիայի մի մասը ծախսվում է տակդիրի առանձին շերտերի միմյանց նկատմամբ շեղման վրա, ինչի հետևանքով մեծանում է պաշտպանիչ կառուցվածքի ներթափանցման առավելագույն արագությունը: Ուսումնասիրվել է ներթափանցման առավելագույն արագության կախվածությունը տակդիրում շերտերի շեղման մեծությունից, ինչպես նաև շերտերի սահքի վրա ծախսված էներգիայի կախվածությունը տակդիրի դեֆորմացված մասի մակերեսից: Ցույց է տրված, որ հարվածող գնդակի միևնույն էներգիայի դեպքում մեր կողմից առաջարկված տակդիրի դեֆորմացիայի խորությունը 1,5 անգամ փոքր է, քան այն տակդիրինը, որում շերտերի սահքը բացակայում է: Առաջարկվող տակդիրի օգտագործումը կերամիկական պաշտպանիչ կառույցներում կարող է զգալիորեն նվազեցնել կառուցվածքի մակերևութային խտությունը:

MULTILAYER ENERGY ABSORBING SUBSTRATE FOR TWO-LAYER
BARRIERS WITH AN EXTERNAL CERAMIC LAYER

P.G. PETROSYAN, L.N. GRIGORYAN

A new type of multilayer energy-absorbing substrate has been proposed, the layers of which are connected with each other by elastic glue. It is shown that when the impactor collides with an obstacle, part of the kinetic energy of the impactor is spent on the displacement of separate layers of the substrate relative to each other, which leads to an increase in the maximum velocity of penetration of the barrier. The dependence of the maximum velocity of penetration of the barrier on the displacement of the substrate layers, as well as the dependence of the energy spent on sliding layers on the area of the deformed part of the substrate, have been studied. It is shown that, at the same impact energy, the depth of deformation of the proposed substrate is 1.5 times less than that of substrates in which the sliding of layers is absent. The use of the proposed substrate in ceramic protective structures allows to significantly reduce the surface density of the structure.