

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАРБОНАТА В ЗАЩИТНЫХ СТРУКТУРАХ

С.Б. Сапожников, А.А. Левинский

APPLICATION OF POLYCARBONATE COMPOSITE MATERIALS IN ARMOR STRUCTURES

S.B. Sapozhnikov, A.A. Levinsky

Рассмотрен слоистый композитный материал на основе поликарбоната, использование которого в качестве вставок для усиления тканевых бронежилетов скрытого ношения может обеспечить защиту одновременно от огнестрельного и холодного оружия. Приведены результаты квазистатических, динамических и огневых испытаний пластин из композитного материала. Показано преимущество композитных пластин перед пластинами из поликарбоната. С помощью метода корреляции цифровых изображений оценено минимальное расстояние от предшествующего прореза, где возможно повторное индентирование пластин без потери защитных свойств.

Ключевые слова: композитные структуры, прорез, локальное воздействие, корреляция цифровых изображений.

The layered polycarbonate composite material has been considered. The plates based on this material used as inserts in fabric-base armor vests can to combine both the fire-arm and sharp edged weapon protection. Quasi-static, dynamic and fire-arm tests of composite plate's results have been exhibited. There is advance of composite plates relative to pure polycarbonate plates. Minimal distance to hit near first puncture, where stabbing protection is safe, has been found with digital image correlation method.

Keywords: composite structures, stab, local impact, digital image correlation.

Введение

Существующие бронежилеты, выполненные из тканевых пакетов в соответствии со стандартом NIJ-0101.06 [1], успешно противостоят атакам из огнестрельного оружия первого и второго классов, однако не могут обеспечить защиту от низкоскоростных ударов колюще-режущего оружия даже при первом уровне угрозы (стандарт NIJ 0115.00 [2]). Тканевые пакеты независимо от толщины или количества слоев арамидной ткани прорезаются стандартными ножами типа P1 при сравнительно небольших усилиях и прокалываются острым колющим инструментом (шило Spike), раздвигая нити.

Современные реалии требуют разработки конструкций, обеспечивающих комбинированную защиту при соблюдении требований скрытности ношения, минимальных стоимости и массы.

На рынке средств индивидуальной защиты предложен ряд технических решений некоторых из отмеченных проблем. Среди них известны пропитка и покрытие тканей специальными составами [3], профильные металлические дискретные элементы TurtleSkin [4] и пропитка арамидных тканей термопластами [5]. Наиболее часто для обеспечения одновременно противопулевой и противоножевой защиты используют вставки (inserts) в карманы чехлов типовых бронежилетов. Эти вставки изготавливают из нержавеющей стали, титана, поликарбоната, нетканых материалов типа прессованных панелей DYNEEMA (волокна, основанные на слабом растворе полиэтилена сверхвысокой молекулярной массы UHMWPE), стеклопластика (двояковыпуклые панели Xtreme Force) [6].

Однако все эти конструкции обладают существенными недостатками. Ткани, пропитанные специальными составами и термопластами, обладают высоким сопротивлением проколу, но

имеют большую массу и невысокое сопротивление прорезу. Также известно, что пропитанные слои арамидной ткани хуже сопротивляются ударам пуль. Конструкции с металлическими дискретными элементами не могут обеспечить защиту от огнестрельного оружия, так как при повороте металлические элементы своими острыми кромками могут разрезать ткань и нанести серьезные повреждения телу. Используемые в названных жестких вставках материалы сравнительно дороги (прессованные полиэтиленовые волокна) или тяжелы (металлы). Наиболее экономичными следует признать защитные панели из поликарбоната. Данный материал обладает достаточной твердостью и жесткостью, чтобы задерживать острые кромки холодного оружия, и достаточно пластичен, чтобы эффективно поглощать энергию высокоскоростного ударника. Однако применение однородного поликарбоната для защиты даже по первому уровню (стандарт [2]) приводит к необходимости использовать сравнительно толстые и тяжелые листы, поскольку он становится хрупким при высоких скоростях деформирования [7]. Поэтому в данной работе рассмотрен композитный материал, полученный посредством модификации листового поликарбоната тканями из высокомодульных волокон [8].

1. Модификация пластин из поликарбоната

Цель модификации – повышение сопротивления прорезу пластины из поликарбоната ножом Р1 и снижение хрупкости при высокой скорости деформирования.

Чтобы определить способ модификации пластин, необходимо рассмотреть механизм их разрушения под действием удара острым инструментом. В момент, когда острый нож начинает контактировать с поверхностью пластины, напряжения под острием превышают предел текучести, возникает пластическая деформация и нож внедряется в материал пластины. В процессе внедрения действие на нож со стороны пластины возрастает, пластина изгибается. Верхние слои

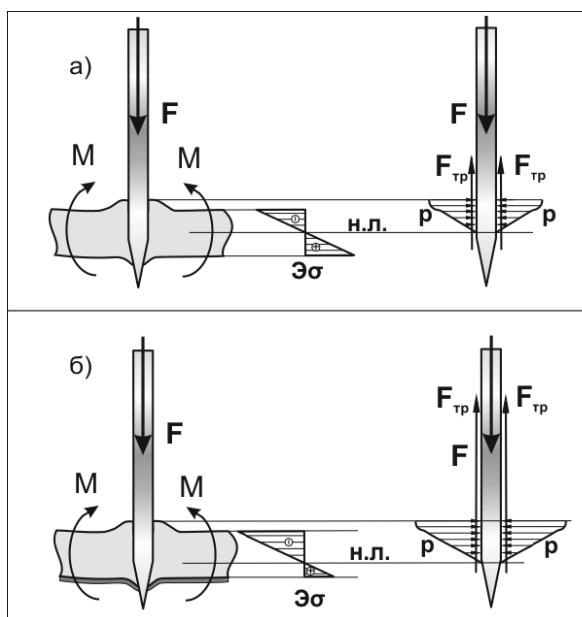


Рис. 1. Схема прорезания пластины

пластины оказываются сжатыми и передают это сжатие на боковые поверхности ножа. Кинетическая энергия ножа тратится не только на пластическое деформирование пластины, но и на преодоление сил трения, причем их вклад может быть весьма значителен. При изгибе пластины нейтральная линия (н. л.) проходит через центр ее сечения (рис. 1, а). На нож действуют контактное давление p и силы трения $F_{тр}$.

Из этой схемы следует, что увеличение усилия трения между боковыми поверхностями ножа и пластиной приведет к увеличению затрат энергии на прорез. Этого можно достичь как с помощью увеличения давления в зоне, где происходит защемление ножа, так и увеличением размеров (высоты) зоны сжатия, например, за счет смещения вниз нейтральной линии сечения. Для этого следует преобразовать однородную пластину в слоистый композит, расположив снизу более жесткий, чем поликарбонат, материал. В данной работе предложено исполь-

зовать в качестве жесткого материала тонкую ткань из высокомодульных арамидных волокон Twaron 709 (рис. 1, б). В качестве дополнительного эффекта армированная тканью пластина обладает более высокой трещиностойкостью, чем однородная, так как ткань препятствует смещению берегов трещины.

2. Эксперименты

В экспериментальной части проведены исследования жесткости пластин на изгиб. Определены усилия сопротивления пластин прорезу при квазистатическом и динамическом видах нагружений. Методом цифровой корреляции изображений определены коэффициенты концентрации напряжений в окрестности острого дефекта – следа от удара ножом. Во всех экспериментах проведено сравнение пластин из поликарбоната и композитных пластин, полученных армированием пластин из поликарбоната арамидной тканью.

2.1. Исследование жесткости пластин

Схема испытаний – трехточечный изгиб пластины шириной 90 мм, длиной 100 мм и толщиной 4 мм. В экспериментах использовалось по 10 образцов каждого типа. По осредненным диаграммам деформирования (рис. 2) видно, что пластина из поликарбоната (1) имеет меньший угол наклона кривой «нагрузка – прогиб», чем композитная пластина (2). Композитные пластины имеют увеличенную на 25–30 % жесткость на изгиб при увеличении массы лишь на 5 %.

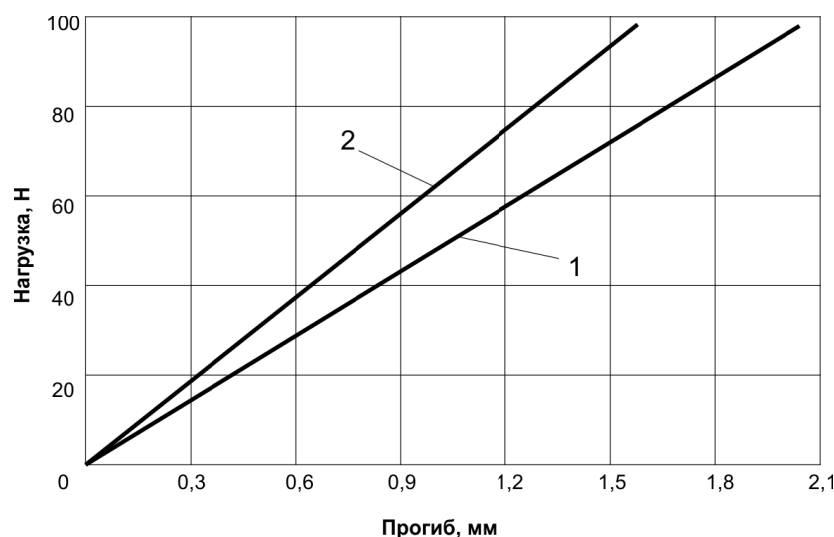


Рис. 2. Диаграмма изгиба пластин:
1 – пластины из поликарбоната; 2 – композитные пластины

2.2. Испытания пластин на прорез

Проведено индентирование образцов, размещенных на эластичной подложке, выполненной по стандарту [2], лежащей на жестком основании. Эксперименты проводили на универсальной испытательной машине Instron 5882. В качестве индентора использовался нож Р1. Образцы представляли собой пластины размером 100×90 мм. В экспериментах использовалось по 10 образцов каждого типа. Построены осредненные диаграммы прореза «усилие прореза – перемещение индентора» (рис. 3).

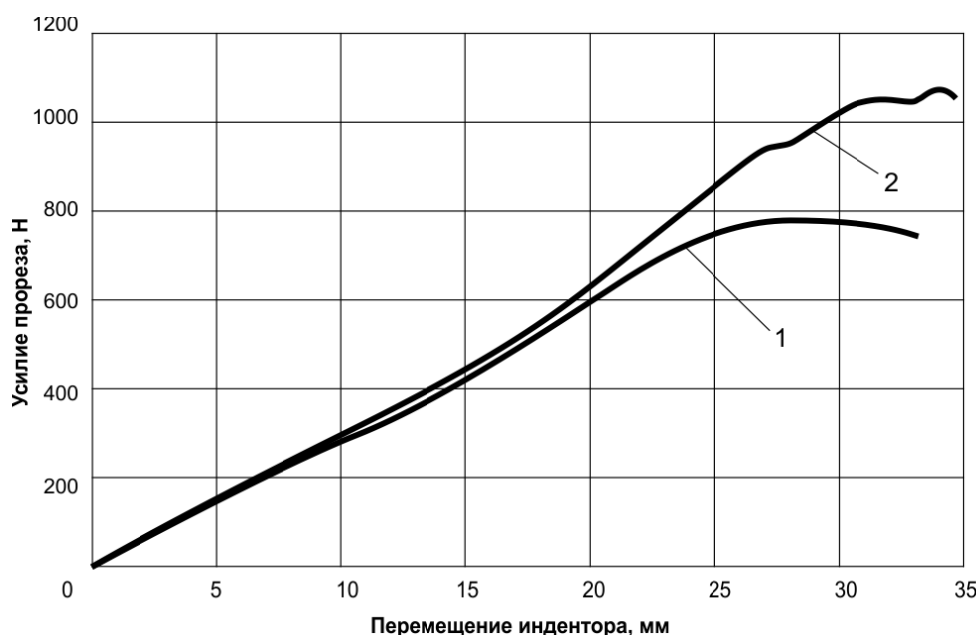


Рис. 3. Диаграмма прореза бронепластин:
1 – пластины из поликарбоната; 2 – композитные пластины

Контроль и испытания

Отсюда следует, что усилие прореза композитных пластин оказывается больше по сравнению с пластинами из поликарбоната на конечном этапе прореза, что подтверждает идеи, предложенные в пункте 1. Глубина проникновения за пределы пластины была одинакова для серий образцов разных типов и составляла 8,5 мм. Результаты испытаний и их сравнение представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение характеристик пластин из поликарбоната и композитных пластин при глубине прореза 8,5 мм

Характеристика	4-миллиметровая пластина из поликарбоната	4-миллиметровая композитная пластина	Различие, %
Максимальное усилие прореза, Н	770 ± 50	1000 ± 75	28–30
Полная рассеиваемая энергия, Дж	15,3 ± 1,07	19,6 ± 1,37	22–25
Рассеиваемая энергия без учета прогиба подложки, Дж	3,6 ± 0,25	4,43 ± 0,31	19–20
Масса пластины, г	42 ± 3	44 ± 3	4,5–5,0

Таким образом, сопротивление прорезу композитных пластин оказалось больше по сравнению с пластинами из поликарбоната в среднем на четверть при увеличении веса не более чем на 5 %. При величине проникновения ножа за пределы пластины 8,5 мм полная рассеиваемая энергия приблизилась к 20 Дж. Если учесть, что под пластинами обычно находится тканевый броне-пакет толщиной 5–6 мм, то проникновение за пределы бронежилета составит 2,5–3,5 мм, что допустимо стандартом [2].

Были проведены испытания с падающей массой с использованием вертикального копра Instron Ceast 9350. Следует отметить, что нагружающее устройство, использованное в этом эксперименте, не в полной мере соответствовало американскому стандарту [2]: применена одномассовая система, подобно европейскому стандарту [9]. В качестве образцов использовали пластины из поликарбоната толщиной 4 и 5 мм, а также композитные пластины толщиной 4,03–4,07 и 5,03–5,07 мм. В экспериментах использовалось по 15 образцов каждого типа. В сравнительной табл. 2 показаны максимальные величины прорезов для серий пластин разных типов.

Таблица 2

Результаты испытаний с падающей массой

Характеристика пластины	4-миллиметровая пластина из поликарбоната	4-миллиметровая композитная пластина	Различие, %	5-миллиметровая пластина из поликарбоната	5-миллиметровая композитная пластина	Различие, %
Глубина проникновения за пределы пластины, мм	15,5	10	35,5	12	9,5	20,8
Глубина проникновения за пределы бронежилета, мм	9,5	4,0	57	6,0	3,5	41,7
Поверхностная плотность, кг/м ²	4,8	5,2	7,6	5,6	5,9	5,1
Удовлетворяет стандарту [2]	НЕТ	ДА		ДА	ДА	

Полученные результаты позволяют говорить о существенном увеличении сопротивления композитных пластин прорезу и при динамических испытаниях.

2.3. Баллистические испытания пластин

Проведены огневые испытания (обстрел стальными сферическими ударниками диаметром 8 мм с различной начальной скоростью по методике [10]). В качестве образцов использованы пластины поликарбоната толщиной 4 и 5 мм, а также композитные пластины. В экспериментах регистрировали начальную и остаточную скорости ударника.

Отмечено, что чем выше начальная скорость ударника, тем меньшее сопротивление оказывает преграда. Оценить эту зависимость позволяют кривые, показанные на рис. 4. Эти кривые представляют собой функции вида

$$V_k = V_0 \left(1 - \exp(-k(V_0 - V_{cr})) \right),$$

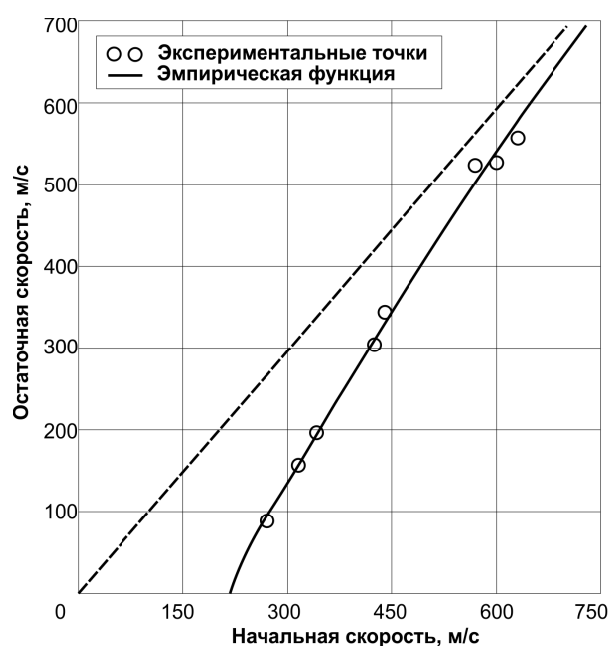
где V_0 – начальная скорость ударника, V_k – остаточная скорость ударника, V_{cr} – критическая скорость («баллистический предел», при котором нет пробоя), k – эмпирический коэффициент.

С помощью этой функции с инженерной точностью можно определить баллистический предел. Так, для пластин толщиной 4 мм этот параметр составил 192 м/с, для 5-миллиметровых пластин – 257 м/с (табл. 3).

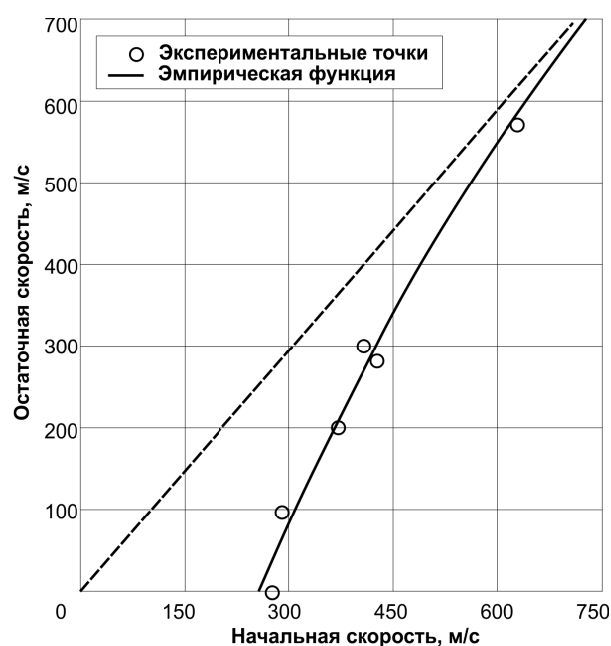
Таблица 3

Результаты баллистических испытаний

Начальная скорость ударника, м/с	Путь, пройденный ловушкой ударника, мм	Остаточная скорость ударника, м/с
4-миллиметровые пластины из поликарбоната		
630	563	557
424	170	306
339	71	198
316	45	158
600	503	527
4-миллиметровые композитные пластины		
441	215	344
569	500	525
5-миллиметровые пластины из поликарбоната		
275	0	0
426	145	283
406	163	300
628	593	572
370	73	201
290	17	97



а)



б)

Рис. 4. Зависимости остаточной скорости ударника от начальной:
а – для пластин толщиной 4 мм; б – для пластин толщиной 5 мм

Пластины из поликарбоната толщиной 4 мм могут снизить скорость ударника в 2 раза при начальной скорости до 300 м/с и в 1,5 раза – при 400 м/с. Пластины толщиной 5 мм снижают скорость ударника в 3,5 раза при начальной скорости 300 м/с и в 1,5 раза – при скорости до 420 м/с. В данном испытании композитные пластины не имеют преимущества перед пластинами из поликарбоната.

2.4. Применение метода корреляции цифровых изображений при исследовании влияния дефекта на работоспособность пластины

В данной работе изучены эффекты, вносимые острыми концентраторами сложной формы и влияющие на прочность и жесткость пластин. Исследована способность пластины с повреждением

эффективно удерживать повторные удары. Обычно в экспериментах в результате индентирования пластины ножом Р1 образуются дефекты сложной формы. Расчет полей деформаций в области концентратора с такой геометрией аналитическими методами затруднителен. Поэтому для решения этой задачи был выбран бесконтактный оптический метод определения полей деформаций – метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) [11]. В этом методе на исследуемую поверхность наносят так называемое спекл-покрытие (speckle pattern) – контрастное изображение, состоящее из пятен, точек, полос или объектов произвольной формы, хаотически распределенных по поверхности. Каждый элемент спекла должен быть сопоставим по размерам с остальными элементами, а расстояние между соседними элементами в среднем равно их размеру. Таким образом, спекл-покрытие определяется лишь одним параметром – размером пятна. При деформировании исследуемого объекта пятна спекла смещаются друг относительно друга. Этот процесс фиксируется цифровыми камерами с заданной частотой кадров. Полученный набор цифровых изображений анализируется с помощью специального программного обеспечения, которое в результате отображает поле деформаций, изменяющихся во времени. По сути это соответствует применению поля малогабаритных тензометров в количестве до нескольких тысяч штук.

Острый дефект на образцах имел длину 7 мм и находился в центре образца шириной 50 мм и длиной 100 мм. В процессе растяжения со скоростью 3 мм/мин стереосистема из двух CCD-камер фиксировала изображения с частотой 1 кадр/с. Средний размер пятна спекла составлял 1 мм. После обработки полученных изображений методом КЦИ в пакете программного обеспечения Correlated Solutions Vic3D были получены поля деформаций на всей поверхности образца. При номинальной деформации 0,5 % максимальный коэффициент концентрации деформаций возле дефекта составил 2,54. На рис. 5, а изображено поле деформаций вдоль оси образца и продольные деформации на линии, проходящей через ось дефекта (перпендикулярно к продольной оси образца).

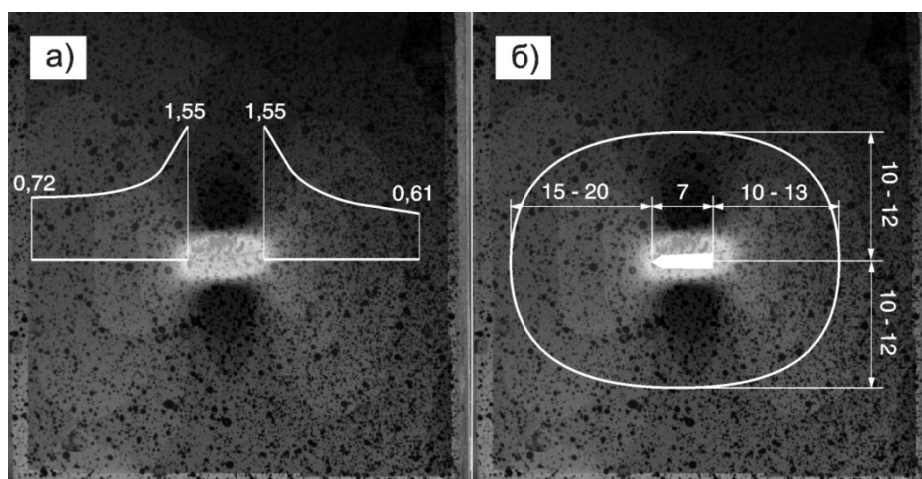


Рис. 5. Поле деформаций в окрестности дефекта: а – полученное методом корреляции цифровых изображений; б – оценка размеров зоны, за пределами которой несущественно влияние дефекта на прочность пластины

На основании полученных результатов можно выделить область в окрестности дефекта, в которой существенно его ослабляющее влияние на прочность и жесткость пластины (рис. 5, б). Эта область имеет максимальный размер около 40 мм. Таким образом, можно утверждать, что пластина способна эффективно удерживать повторные удары, нанесенные ножом, на расстоянии от 20 мм от уже имеющегося дефекта.

Выводы

Проведены экспериментальные исследования жесткости однородных и композитных пластин из поликарбоната при изгибе, характеристик сопротивления прорезу и пробою высокоскоростными ударниками сферической формы. Доказано, что композитные пластины имеют сопротивление прорезу выше на 30–50 % по сравнению с пластинами из поликарбоната той же толщины и обеспечивают первый уровень защиты (по стандарту [2]) от действия холодного оружия при увеличении массы не более 5 %. Пластины из поликарбоната толщиной 4–5 мм могут снизить скорость ударника в 2–3 раза при начальной скорости 300–400 м/с. С помощью метода корреляции

цифровых изображений изучено деформированное состояние области пластины, прилегающей к дефекту сложной формы, и показано, что пластины способны удерживать повторные локальные удары, нанесенные на расстоянии от 20 мм от имеющегося дефекта.

Применение композитных пластин в качестве жестких вставок позволяет поднять уровень защиты бронежилетов на один класс по стандарту [12] при незначительном увеличении массы и стоимости. Такие пластины придают необходимую защиту от действия холодного оружия при первом уровне угрозы по стандарту [2].

Литература

1. *NIJ Standard – 0101.06. Ballistic Resistance of Body Armor.* – Washington: National Institute of Justice, 2008. – 40 p.
2. *NIJ Standard – 0115.00. Stab Resistance of Personal Body Armor.* – Washington: National Institute of Justice, 2000. – 46 p.
3. Харченко, Е.Ф. Материалы на основе арамидных волокон для защиты от холодного оружия / Е.Ф. Харченко, С.В. Заикин // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 1999. – Вып. 1–2. – С. 46–47.
4. *TurtleSkin personal protective equipment.* – <http://www.turtleskin.com/puncture-protection.aspx>
5. *Stab and puncture characterization of thermoplastic-impregnated aramid fabrics* / J.B. Mayo, E.D. Wetzel, M.V. Hosur, S. Jeelani // *International Journal of Impact Engineering.* – 2009. – V. 36, Issue 9. – P. 1095–1105.
6. *Trauma Inserts – ABA.* – <http://www.americanbodyarmor.com/EcommerceProduct.aspx?ProductID=42&ProductCategoryID=4>
7. *Fu, S. Tension testing of polycarbonate at high strain rates* / S. Fu, Y. Wang, Y. Wang // *Polymer Testing.* – 2009. – V. 28, Issue 7. – P. 724–729.
8. Заявка 2011154737 Российская Федерация, МПК F 41 H1/02. Композитный бронезащитный элемент / С.Б. Сапожников, А.Л. Левинский. – № 2011154737/12(082224); заявл. 30.12.2011; приоритет 30.12.2011.
9. *German Schutzklassen – Bullet Resistant Vests with Stab Protection.* – Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., – 2003. – 25 p.
10. Форенталь, М.В. Динамика деформирования и разрушения пластин при высокоскоростном нагружении ударниками со сложной структурой: дис. ... канд. техн. наук / М.В. Форенталь. – Челябинск, 2010. – 174 с.
11. *Sutton, M.A. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Basic Concepts, Theory and Applications* / M.A. Sutton, J.J. Ortu, H.W. Schreier. – New York: Springer, 2009. – 322 с.
12. ГОСТ Р 50744-95. Бронеодежда. Классификация и общие технические требования. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 9 с.

Поступила в редакцию 13 марта 2012 г.

Сапожников Сергей Борисович. Доктор технических наук, профессор, декан заочного инженерно-экономического факультета, Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – механика композитных материалов, разработка защитных структур, применение нанотехнологий в промышленности, материалы на основе технической керамики, высокопрочные и «умные» материалы и конструкции. E-mail: ssb@susu.ac.ru

Sergei B. Sapozhnikov. The doctor of engineering science, professor, the dean of faculty of engineering and economy by correspondence, South Ural state university. The area of scientific interests – mechanics of composite materials, armor structures, nanotechnology in industry, technical ceramics, high strength and smart materials and structures. E-mail: ssb@susu.ac.ru

Левинский Антон Александрович. Аспирант кафедры «Прикладная механика, динамика и прочность машин», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – механика композитных материалов, разработка защитных структур, материалы на основе технической керамики. E-mail: 9782675@gmail.com

Anton A. Levinsky. PhD student of the Applied mechanics, dynamics and strength of machines department, South Ural state university. The area of scientific interests – mechanics of composite materials, armor structures, technical ceramics. E-mail: 9782675@gmail.com