УДК 539.37 + 620.9.004.18

ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ АРАМИДНОЙ ТКАНИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЕМ ЭНЕРГИИ УДАРА В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ

(поступила в редакцию – 15.11.2015, принята в печать – 20.11.2015)

А.В.Игнатова, С.Б.Сапожников

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Представлены экспериментальные результаты по влиянию поверхностной обработки арамидной ткани полимерными композициями, содержащими наноалмазы и углеродные нанотрубки, на эффективность рассеяния кинетической энергии пули фрикционными эффектами. В первой части статьи представлены квазистатические испытания - вытягивание нити из арамидной ткани полотняного переплетения P110. Во второй части проведены баллистические испытания для определения влияния поверхностной обработки ткани на величину глубины вмятины в специальном пластилине. Для примера поверхностная обработка тканей с утяжелением до 6% позволяет увеличить фрикционное взаимодействие между нитями в 4 раза и приводит к снижению прогиба тканевого пакета при локальном ударе примерно на 20%. Показано также, что обработка вязкими жидкостями, эффективная при квазистатическом вытягивании нитей, теряет свою эффективность при локальном ударе.

Ключевые слова: арамидные ткани, поверхностная обработка, вытягивание нити, локальный удар.

SURFACE TREATMENT OF ARAMID FABRICS TO THE CONTROL IMPACT ENERGY ABSORPTION IN LAYERED COMPOSITES

I.V.Ignatova, S.B.Sapozhnikov

South Ural state university, Chelyabinsk, Russia

An experimental study of an effect of aramid fabric surface treatment by polymer compositions with nanodiamonds or carbon nanotubes on impact energy dissipation were presented. Dry friction between yarns of fabric is an effective way to absorb kinetic energy of a bullet. In the first part of the paper, the results of quasi-static yarn pull-out test of aramid plain woven fabric is presented. In the second part, the ballistic tests conducted to determine an effect of the surface treatment on the depth of indentations in a special plasticine. For example, surface treatment of fabrics with addition of just 5 wt. % increases the frictional interaction between yarns by 4 times and reduces the deflection of multilayer textile package under a local impact by about 20%. It is also shown that the viscous fluid, which is working effectively under quasi-static yarn pull-out test, loses its effectiveness under local impact.

Keywords: aramid fabric, surface treatment, yarn pull-out test, local impact.

1. Введение

В настоящее время арамидные волокна и ткани гладкого плетения (полотно, саржа, сатин) широко применяются в качестве армирующих элементов конструкционных полимерных композитов, а также в ударопрочных структурах [1-3]. Высокие значения удельного модуля упругости и удельной прочности арамидных нитей обеспечивают эффективное нагружение нитей основы и утка, отводящих энергию пули за счет упругих деформаций в динамической фазе работы ткани. Следует, однако, отметить, что в защитных структурах (бронежилеты, щиты, каски) размеры используемых тканей ограничены величинами порядка 30-50 см, что приводит к длительности динамической фазы порядка 30...50 мкс (скорость звука в арамидных нитях составляет 9...10 км/с). Оценка общего времени торможения пули в тканевом бронежилете 1 класса по ГОСТ Р 50744-95, например, пистолета ПМ (скорость вылета ~300 м/с) дает величину ~200...300 мкс (считали движение пули равнозамедленным, бронежилет располагали на слое специального пластилина и фиксировали вмятину – прогиб тыльной стороны бронежилета – допустимой величины 30...40 мм). Отсюда следует, что более 75% времени торможения пули бронежилет работает в условиях низкоскоростного нагружения и рассеяние энергии пули происходит за счет фрикционных эффектов в тканях (распрямление и вытягивание нитей [4-9]) и пластических деформаций в слое пластилина. Стремление к уменьшению глубины вмятины в пластилине после удара пули связано со снижением вероятности получения серьезной запреградной (контузионной) травмы тела человека, которую оценивают по величине энергии, переданной телу человека [10, 11]. Имеется медицинская квалификация тяжести получаемых травм по величине энергии, в которой величина 20 Дж считается предельно допустимой (средняя степень тяжести). Расчетные оценки энергии деформирования пластилина показывают гораздо большие величины (до 50 Дж при ударе пули ПМ в бронежилет 1 класса) даже при допустимых глубинах вмятин. Это приводит к тому, что человек остается жив, но появляются ушибы, осадненные раны, переломы ребер.

Для снижения величины прогиба тыльной стороны бронежилета применяют различные способы модернизации тканевых пакетов: сквозная прошивка [1, 12-15], комбинирование слоев тканей разных типов переплетения [16, 17], использование неньютоновских жидкостей [14, 15, 18-20], композиций с абразивными частицами [12, 21] и др. Однако, прошивка снижает гибкость и комфортность ношения, комбинирование тканей усложняет логистику и увеличивает стоимость, пропитка аномально вязкими жидкостями многократно увеличивает поверхностную плотность тканей [14, 20], покрытие композициями с абразивными частицами работает лишь для случая прокола/прореза.

В связи с отмеченными проблемами модификации тканей в данной статье нами экспериментально изучены новые способы поверхностной обработки арамидной ткани полотняного переплетения, приводящие к увеличению фрикционного взаимодействия нитей и снижению прогиба тканевых пакетов при локальном ударе с минимальным утяжелением.

2. Изготовление образцов

В работе предложены технологические приемы модификации поверхности ткани полотняного переплетения типа P110, изготовленной из арамидных нитей РУСАР линейной плотностью 29 текс. Поверхностная плотность ткани составляет 110 г/кв.м. Технологические приемы можно разделить на группы, приводящие, во-первых, к увеличению трения нитей при вытягивании из ткани и, во-вторых, к усилению вязкого взаимодействия (полимеры и аномально вязкие суспензии).

Рассмотрены варианты:

1. исходная ткань без поверхностной обработки;

2. водная эмульсия ПВА, содержание сухого вещества 7%, утяжеление ткани 6,2%;

3. водная эмульсия ПВА, содержание сухого вещества 7% + МУНТ (многостенные углеродные нанотрубки марки «Таунит-МД», производство АО «НТЦ», г. Тамбов, 1% по массе), утяжеление ткани 2,5%;

4. эластомер марки RTV silicone, производство США, а) красный, б) синий и в) прозрачный, утяжеление ткани 4%, 6%; и 9% соответственно;

5. эластомер марки RTV silicone (прозрачный) + МУНТ (Таунит-МД 1% по массе), утяжеление ткани 14%;

6. Водная суспензия акрилового герметика (производство АО «Новбытхим», г. Санкт-Петербург, содержание твердого вещества 10%), утяжеление ткани 20%;

7. Эпоксидная смола ЭД-20, утяжеление ткани 31%;

8. Суспензия эпоксидной смолы ЭД-20 и наноалмазов (производство АО «НТЦ», г. Снежинск, 1% по массе), утяжеление ткани 33%;

Все водные суспензии наносили на ткань плоским шпателем так, чтобы материал оставался лишь в местах переплетения (минимально возможное количество), после чего выдерживались в сушильном шка-

фу 24 часа при температуре 60°С до полного высыхания водной основы. Эластомеры и герметики были влагоотверждаемыми, их выдерживали при комнатной температуре и относительной влажности 70% в течение 48 часов до полной полимеризации.

Размеры образцов тканей для исследований усилий вытягивания имели размеры 50×50 мм, а для испытаний на удар – 80×80 мм.

3. Вытягивание нитей

Удар пули в тканевый бронежилет сопровождается вытягиванием нитей, лежащих непосредственно под пулей, из нитей перпендикулярного семейства. В зоне контакта с пулей может находиться разное количество нитей, это зависит от формы носка пули. Поэтому в наших экспериментах проводились опыты с вытягиванием 1,3 и 5 нитей из ткани полотняного переплетения P110 в условиях сухого трения. Края тканевого образца были покрыты полосками плотной бумаги шириной 20 мм, обеспечивая защемление этих зон в тисочных захватах INSTRON 2710-106, рис. 1. Свободная зона, из которой происходило вытягивание нитей, имела ширину 10 мм. Вытягиваемые нити также закрепляли в тисочном захвате, поверхности которого покрыты тонким слоем эластомера, что обеспечивало эффективную передачу нагрузки на нити без их травмирования. Эксперименты по вытягиванию нитей из ткани проводили на универсальной машине INSTRON 5882 со скоростью 50 мм/мин при комнатной температуре.



Рис. 1. Схема закрепления образца при вытягивании нити: Р – нагрузка, штриховка – заделка

На рис. 2 представлены результаты испытаний «сила – перемещение» для исходной ткани при вытягивании одной, трех и пяти нитей (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Отметим, что усилие разрыва одной арамидной нити линейной плотностью 29 текс составляет ~50 Н (предел прочности волокон равен ~2500 МПа).

Диаграммы вытягивания имеют два участка: возрастания нагрузки до перемещения 2-2,5 мм и снижения до нуля при полной вытяжке нити из ткани. При возрастании нагрузки нить практически выпрямляется, при этом свободный конец нити еще неподвижен. Кажущееся удлинение (2 мм/50 мм = 4%) хорошо согласуется с увеличением длины нитей в полотняном переплетении. Очевидно, что саржевое или сатиновое переплетение будут иметь меньшее кажущееся удлинение.



Рис. 2. Кривые «нагрузка – перемещение» при вытягивании 1, 3 и 5 нитей из ткани Р110

Учитывая регулярную структуру ткани и выпуклую форму поперечного сечения нитей, можно предположить, что нить касается ортогонального семейства на дуге α с коэффициентом трения f. Тогда, используя формулу Эйлера для трения гибкой нити на поверхности цилиндра, получим, опуская элементарные преобразования, зависимость усилия вытяжки от перемещения в виде:

$$P(x) = q \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot f \cdot (L - x)}{\Delta}\right)$$
(1)

где L – длина нити, x – вытяжка нити, α – дуга охвата, f – коэффициент трения, Δ – шаг переплетений, q – начальное усилие на свободном конце нити (эмпирическая константа, определяемая материалом и типом переплетения нитей в ткани). Для исследованной ткани Р110: q = 0,14 H, $\Delta = 0,5$ мм, L = 50 мм, $\alpha f = 2^{\circ}$ (для коэффициента трения 0,2 угол охвата оказывается равным ~10°).

Анализ зависимости (1) показывает, что незначительное увеличение коэффициента трения (на 10%) приводит к существенному (42%) увеличению усилия вытягивания и, соответственно, энергии вытягивания.

Диаграммы вытягивания 3 и 5 нитей получаются умножением диаграммы вытягивания одной нити на

коэффициент k, нелинейно зависящий от числа n нитей: $k = 0,083 \cdot n + n^2 - 0,083 \cdot n^3$ (получено обработкой экспериментальных данных). То есть для вытягивания трех нитей $k \approx 7$, а для 5 нитей $k \approx 15$. Максимальное усилие вытягивания одной нити составляет ~7 H (при нагрузке разрыва 50 H). На рис.3-4 приведены диаграммы вытягивания всех испытанных образцов. Для сравнения на каждом рисунке приводится кривая вытягивания нити из исходной ткани (№1).

В таблице 1 представлены значения поверхностной плотности ρ, максимального усилия F_{\max} , энергии W и удельной энергии W/ρ при вытягивании нити из ткани P110 с различными обработками.

Поверхностная обработка существенно повышает максимальное усилие вытягивания. Получено даже, что обработка по типу 6 приводит к обрыву нити до начала вытягивания. То есть такая обработка нерациональна.

Анализ результатов вытягивания нитей показал, что вязкие жидкости вместо сухого трения создают «трение», при котором величина касательных напряжений в контактной паре зависит от скорости сдвига. В



Рис. 3. Кривая «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити из ткани с пропиткой



Рис. 4. Кривая «нагрузка – перемещение» при вытягивании нити из ткани

квазистатических экспериментах эта скорость была сравнительно небольшой и нити не разрывались. При ударных испытаниях возможен разрыв нитей с такой обработкой или «разрушение» слоя вязкой жидкости из-за перехода от ламинарного к турбулентному течению.

Максимальные рейтинги по критерию удельной энергии имели место у аномально вязкой жидкости №8 на основе эпоксидной смолы и наноалмазов, композиций ПВА+МУНТ (№3) и ПВА (№2). Композиции на основе ПВА создали более высокий коэффициент сухого трения наряду с начальным эффектом склеивания, выразившимся в росте максимального усилия вытяжки.

4. Испытания на локальный удар

В этой части статьи приводятся результаты испытаний образцов тканей размерами 80×80 мм с поверхностной обработкой при обстреле с относительно низкими скоростями (50-120 м/с) из пневматического пистолета ИЖ55М стальными шариками O4,5 мм и свинцовыми пулями типа Бета массой 0,5г на слое специального пластилина (подобно тому как это делается при испытаниях бронежилетов по ГОСТ Р 50774-95 или стандарту США NIJ 0101-06). Важно отметить, что вытягивание нитей в п.3 происходило при квазистатических условиях, а работа ткани с пулями – при существенно динамических. Скорости удара были недостаточны для разрыва тканей, поэтому мы полагали, что рассеяние энергии будет происходить лишь за счет вытягивания нитей и деформирования пластилина.

Скорость пули фиксировали с помощью хронографа S04 с погрешностью ±1 м/с. Ткани укладывали на поверхность пластилина без закрепления. Во всех экспериментах на поверхности пластилина были получены отпечатки, глубину которых измеряли по срезам методом фотографирования с обработкой изображения на компьютере (рис. 5). Количество слоев ткани P110 в пакете было три, чтобы глубина отпечатка была хорошо измеримой.



Рис. 5. Профиль отпечатков в пластилине

На рис. 6 приведены зависимости глубины прогиба пакетов (отпечатков в пластилине) от начальной скорости пули. В таблице 2 представлены типы поверхностной обработки, глубины вмятин и скорости пули.

Кривая №1 построена по результатам испытаний исходной ткани и используется ниже для сравнения с поверхностно модифицированными вариантами при разных скоростях. Для сравнительной оценки эффективности обработки предложено использовать критерий удельного снижения прогиба *ζ*:

$$\zeta = \frac{w_1 - w_0}{w_0 \cdot \rho} \,, \tag{2}$$

где w_1 и w_0 – прогибы обработанной и исходной тканей при одной и той же скорости пули, ρ – поверхностная плотность обработанной ткани.

Максимальные рейтинги по критерию относительной величины прогиба ζ имели место у следующих композиций: ПВА (№2), RTV (прозрачный эластомер) + МУНТ (№5) и Эпоксидная смола ЭД-20 + наноалмазы (№8). Ткани, обработанные вязкой жидкостью, не показали удовлетворительных результатов по сравнению с экспериментами на вытягивание нитей (п.3).

Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование свойств арамидных тканей полотняного переплетения с различными поверхностными обработками при статическом (вытягивание нити) и низкоскорост-



Рис. 6. Кривая «глубина отпечатка в пластилине – начальная скорость пули»

Таблица 1

Характеристики	вытягивания	нити из ті	кани Р110	полотняного	переплетения		
(исходной и с поверхностной обработкой)							

№	Тип пропитки	Поверх. плотность с учетом пропитки с, кг/м ²	% увели чен ие мас сы	Макс. сила F _{max} , Н	Энергия W, Дж	W/c	Рейтинг
1	-	110	-	6,49	0,088	8,00E-04	
	-	110	-	7,00	0,079	7,18E-04	
2	водная эмульсия	116,9	6,2	23,99	0,205	1,75E-03	Ш
	ПВА	116,9	6,2	24,87	0,227	1,94E-03	111
3	водная эмульсия	112,8	2,5	20,50	0,229	2,03E-03	п
	ПВА + МУНТ	112,8	2,5	17,89	0,206	1,83E-03	11
40	красный	114,3	3,9	9,63	0,116	1,01E-03	
4 a	эластомер	114,3	3,9	8,86	0,132	1,15E-03	
4	4 б синий эласто мер	117,0	6,4	13,91	0,177	1,51E-03	W
б		117,0	6,4	15,16	0,214	1,83E-03	1 V
4	прозрачный	119,6	8,7	7,65	0,095	7,95E-04	
в	эластомер	119,6	8,7	7,29	0,085	7,11E-04	
	прозрачный	125,7	14,3	17,22	0,188	1,50E-03	
5	эластомер + МУНТ	125,7	14,3	16,18	0,189	1,50E-03	
	Водная	132,3	20,3	24,24	0,345	1,66E-03	
6	суспензия акрилового герметика	132,3	20,3	29,33	0,426	2,05E-03	
7	эпоксидная	143,7	30,6	16,22	0,234	1,63E-03	17
	смола ЭД-20	143,7	30,6	15,90	0,233	1,62E-03	V
8	эпоксидная	146,5	33,2	27,77	0,514	3,51E-03	T
	смола ЭД-20+ наноалмазы	146,5	33,2	23,53	0,434	2,96E-03	I

Таблица 2

Характеристики тканей Р110 с ра	азличными	видами	поверхностной	обработки			
при локальном ударе							

N⁰	Тип обработки	Поверх. плотност ь ткани с, кг/м ²	увеличени е массы ткани, %	Скорост ь пули, м/с	Глубина вмятин ы <i>w</i> , мм	$\Delta w = \frac{w_0 - w_{np}}{w_0},$ MM/MM	$\zeta = \frac{\exists w/c}{x10^3}$	Рейтинг
1	Без обработки	110	-	108 102 104 107 69 78 99 71 51	$\begin{array}{r} 4,27\\ 4,78\\ 4,3\\ 4,82\\ 3,16\\ 3,17\\ 4,46\\ 2,67\\ 1,89\\ \end{array}$	0	0	-
2	водная эмульсия ПВА	116,9	5,8	114	4,27	0,186	1,6	Ι
3	водная эмульсия ПВА + МУНТ	112,8	2,5	91 93 94 107	3,63 3,80 3,77 4 39	0,079	0,70	V
4a	Красный эластомер	114,3	3,9	99 106	4,16	0,057	0,50	
4б	Синий эластомер	117,0	6,4	-	-	-	-	-
4в	Прозрачный эластомер	119,6	8,7	107	4,56	0,050	0,42	
5	Прозрачный эластомер + МУНТ	125,7	14,3	109 103 107	4,22 3,83 3,93	0,164	1,30	II
6	Водная суспензия акрилового герметика	132,3	20,3	108 97	4,48	0,093	0,70	IV
7	Эпоксидная смола ЭД-20	143,7	30,6	112 108	4,58 4,42	0,100	0,7	VI
8	Эпоксидная смола ЭД-20 + наноалмазы	146,5	33,2	112 111	4,19 4,59	0,143	0,98	III

ном ударном нагружении (пулей пневматического пистолета со скоростью около 100 м/с). Статические испытания на вытягивание нитей из ткани показали, что исследованные типы поверхностной обработки ткани значительно повышают максимальное усилие и энергию фрикционных связей, затрачиваемую на вытягивание. Наивысший рейтинг получила суспензия ЭД-20 с наноалмазами. При баллистическом ударе пулей пневматического пистолета поверхностная обработка позволяет снизить величину прогиба тыльной стороны ткани до 20% при утяжелении на 6% по сравнению с исходной тканью. Наивысший рейтинг в этих испытаниях получила обработка эмульсией ПВА, которая после удаления воды обеспечила существенный рост коэффициента сухого трения между нитями с утяжелением лишь на 6%.

Показано, что ткани, обработанные невысыхающей вязкой суспензией, хорошо рассеивают энергию лишь при статическим нагружении. В динамике становятся эффективными обработки, обеспечивающие сухое трение. При этом сильные связи между нитями могут привести к увеличению вероятности разрыва длинных нитей.

Благодарность

Исследование выполнено в Южно-Уральском государственном университете (национальном исследовательском университете) за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00327). Все эксперименты проведены на оборудовании научно-образовательного центра «Нанотехнологии» ЮУрГУ.

Библиографический список

1. Lightweight ballistic composites, eds. A. Bhatnagar, Cambridge: Woodhead publishing limited, 2006. 429 p.

2. Михайлин Ю.А., *Специальные полимерные композиционные материалы*. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 660 с.

3. Kolopp A., Rivallant S., Bouvet Ch., Experimental study of sandwich structures as armour against medium-velocity impacts. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, vol. 61. pp. 24-35.

4. Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В., *Материалы и структуры легкой бронезащиты*: учебник. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 191 с.

5. Харченко Е.Ф., Закономерности и парадоксы разрушения текстильных бронематериалов при осколочном воздействии. Вопросы оборонной техники. Серия 15, 2008, вып. 1(148)- 2(149), с. 3-6.

6. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н., *Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования.* – М.: Изд-во РадиоСофт, 2008. – 406 с.

7. Zhu D., Soranakom C., Mobasher B., Rajan S.D., Experimental study and modeling of single yarn pull-out behavior of Kevlar[®] 49 fabric. *Composites: Part A*, 2011, vol. 42, pp. 868 – 879.

8. Nilakantan G., Merrill R.L., Keefe M., Gillespie Jr. J.W., Wetzel E.D., Experimental investigation of the role of frictional yarn pull-out and windowing on the probabilistic impact response of Kevlar fabrics. *Composites: Part B*, 2015, vol. 68, pp. 215-229.

9. Das S., Jagan S., Shaw A., Pal A., Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact. *Composite Structures*, 2015, vol. 120, pp. 129-140.

10. Сахарова Н.А., Разработка методологии проектирования эргономичных бронежилетов с использованием композиционных текстильных материалов. канд. дисс. Иваново, 2003. 212 с.

11. Попов Л.В., Судебно-медицинская баллистика. – СПб: Гиппократ, 2002. – 656 с.

12. Ahmad M.R., Ahmad W.Y.W., Salleh J., Samsuri A., Effect of fabric stitching on ballistic impact resistance of natural rubber coated fabric systems. *Materials and Design*, 2008, vol. 29, pp. 1353–1358.

13. Karahan M., Kus A., Eren R., An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, vol. 35, pp. 499–510.

14. Kang T.J., Lee S.H., Effect of stitching on the mechanical and impact properties of woven laminate composite. *Journal of Composite Materials*, 1994, vol. 28(16), pp. 1574-1587.

15. Park J.L., Yoon B. II, Paik J.G., Kang T.J., Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part I – Effect of laminating sequence. *Textile Research Journal*, 2012, vol. 82(6), pp. 527-541.

16. Долганина Н.Ю., Деформирование и разрушение слоистых тканевых пластин при локальном ударе. канд. дисс. Челябинск, 2010.128 с.

17. Bova V.G., Fedorov V.A., Tikhonov I.V., Bashchenko A.P., Slugin I.V., Situkha V.N., Lebedeva N.A., L'vov V.V., Anilionis G.P., Vasil'ev Ju.L., Karusevich A.S., Ballistic protection cloth and pack based on ballistic protection cloth. Patent RU No. 2175035 of 20.10.2001.

18. Majumdar A., Butola B.S., Srivastava A., Development of soft composite materials with improved impact resistance using Kevlar fabric and nano-silica based shear thickening fluid. *Materials and Design*, 2014, vol.54, pp. 295 – 300.

19. Моссаковский П.А., Колотников М.Е., Антонов Ф.К., Исследование процесса пробивания многослойной преграды из тканевого композита с нанокомпозитной пропиткой. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2009, № 10 (67), с. 151–155.

20. Lee B.-W., Kim I.-J., Kim Ch.-G., The Influence of the Particle Size of Silica on the Ballistic Performance of Fabrics Impregnated with Silica Colloidal Suspension. *Journal of composite materials*, 2009, vol. 43, N 23, pp. 2679-2698.

21. Харченко Е.Ф., Заикин С.В., Материалы на основе арамидных волокон для защиты от холодного оружия. Вопросы оборонной техники. Серия 15, 2000, № 1(122), с. 28–29.

References

1. Lightweight ballistic composites, eds. A. Bhatnagar, Cambridge: Woodhead publishing limited, 2006. 429 p.

2. Mihaylin Yu.A., *Spetsial'nye polimernye kompozitsionnye materialy* [Special polymer composite materials]. St. Peterburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2008. 660 p. (in Russian).

3. Kolopp A., Rivallant S., Bouvet Ch., Experimental study of sandwich structures as armour against medium-velocity impacts. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, vol. 61. pp. 24-35.

4. Kobilkin I.F., Selivanov V.V., *Materialy i struktury legkoi bronezashchity: uchebnik* [Materials and structure of lightweight body armour: textbook]. Moscow, izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014. 191 p. (in Russian).

5. Kharchenko E.F., Mechanisms and paradoxes of fabric armor materials failure under the impact of fragments. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriia* 15 – *Defense Engineering Problems. Series* 15, 2008, Issues 1(148)-2(149), pp. 3-6. (in Russian)

6. Grigoryan V.A., Kobilkin I.F., Marinin V.M., Chistiakov E.N., *Materialy i zashchitnye struktury dlia lokal'nogo i individual'nogo bronirovaniia* [Materials and protection structures for local and individual armours]. Moscow, izd-vo RadioSoft, 2008. 406 p. (in Russian)

7. Zhu D., Soranakom C., Mobasher B., Rajan S.D., Experimental study and modeling of single yarn pull-out behavior of Kevlar[®] 49 fabric. *Composites: Part A*, 2011, vol. 42, pp. 868 – 879.

8. Nilakantan G., Merrill R.L., Keefe M., Gillespie Jr. J.W., Wetzel E.D., Experimental investigation of the role of frictional yarn pull-out and windowing on the probabilistic impact response of Kevlar fabrics. *Composites: Part B*, 2015, vol. 68, pp. 215-229.

9. Das S., Jagan S., Shaw A., Pal A., Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact. *Composite Structures*, 2015, vol. 120, pp. 129-140.

10. Sakharova N.A., *Razrabotka metodologii proektirovaniia ergonomichnykh bronezhiletov s ispol'zovaniem kompozitsionnykh tekstil'nykh materialov. PhD thesis* [Development of methodology of designing ergonomic body armor using the composite textile materials. PhD thesis]. Ivanovo, 2003. 212 p. (in Russian).

11. Popov L.V. Sudebno-meditsinskaia ballistika [Forensic Ballistics]. St. Peterburg, Gippokrat, 2002. 656 p. (in Russian).

12. Ahmad M.R., Ahmad W.Y.W., Salleh J., Samsuri A., Effect of fabric stitching on ballistic impact resistance of natural rubber coated fabric systems. *Materials and Design*, 2008, vol. 29, pp. 1353–1358.

13. Karahan M., Kus A., Eren R., An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, vol. 35, pp. 499–510.

14. Kang T.J., Lee S.H., Effect of stitching on the mechanical and impact properties of woven laminate composite. *Journal of Composite Materials*, 1994, vol. 28(16), pp. 1574-1587.

15. Park J.L., Yoon B. II, Paik J.G., Kang T.J., Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part I – Effect of laminating sequence. *Textile Research Journal*, 2012, vol. 82(6), pp. 527-541.

16. Dolganina, N.Yu., *Deformirovanie i razrushenie sloistykh tkanevykh plastin pri lokal'nom udare*. PhD thesis [Deformation and fracture of layered fabric plate under the local impact. PhD thesis]. Chelyabinsk, 2010. 128 p. (in Russian).

17. Bova V.G., Fedorov V.A., Tikhonov I.V., Bashchenko A.P., Slugin I.V., Situkha V.N., Lebedeva N.A., L'vov V.V., Anilionis G.P., Vasil'ev Ju.L., Karusevich A.S., Ballistic protection cloth and pack based on ballistic protection cloth. Patent RU No. 2175035 of 20.10.2001 (In Russian).

18. Majumdar A., Butola B.S., Srivastava A., Development of soft composite materials with improved impact resistance using Kevlar fabric and nano-silica based shear thickening fluid. *Materials and Design*, 2014, vol.54, pp. 295 – 300.

19. Mossakovsky P.A., Kolotnikov M.E., Antonov F.K. Investigation of punching multilayer woven composite barrier treated with nanocomposite fliud. *Aviatsionno-kosmicheskaia tekhnika i tekhnologiia* – *Aerospace technic and technology*, 2009, № 10 (67), pp. 151-155 (In Russian).

20. Lee B.-W., Kim I.-J., Kim Ch.-G., The Influence of the Particle Size of Silica on the Ballistic Performance of Fabrics Impregnated with Silica Colloidal Suspension. *Journal of composite materials*, 2009, vol. 43, no. 23, pp. 2679-2698.

21. Kharchenko E.F., Zaikin S.V. Materials based on aramid fibers for protection from cold weapons. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Seriia 15 – Defense Engineering Problems. Series 15*, 2000, no. 1(122), pp. 28-29.

Сведения об авторах

А.В. Игнатова: инженер Заочного инженерно-экономического факультета Южно-Уральского государственного университета (НИУ), Челябинск, Россия, *ign.nastya@gmail.com*, тел +7(908) 818 80 97;

С.Б. Сапожников¹: д-р техн. наук, проф., проф. Южно-Уральского государственного университета (НИУ), Челябинск, Россия, <u>ssb@susu.ac.ru</u>, тел +7(351) 267 91 19.

¹ Контактное лицо