

Исследование взаимосвязи между параметрами строения ткани и ее защитной способностью при прорезании

П. Е. Сафонов

ООО «ТЕКС-ЦЕНТР», Российская Федерация

Аннотация. Работа посвящена исследованию особенностей деформирования защитных тканей различных структур при низкоскоростном внедрении индентора в виде ножа и установлению взаимосвязи между параметрами строения ткани и особенностями ее разрушения. В качестве объекта исследования выбрана ткань на основе арамидных комплексных нитей 29,4 текс с поверхностной плотностью порядка 160 г/м².

В рамках проведенной работы установлена взаимосвязь между усилием вытягивания нитей, устойчивостью при прорезании ткани и коэффициентом связности ткани. Установлено, что с увеличением коэффициента связности наблюдается экспоненциальный рост усилия вытягивания нитей основы и утка из ткани.

Установлено, что ткань полотняного переплетения обладает наивысшей защитной способностью при прорезании ножом, это обусловлено монолитностью структуры ткани (достигнуты максимальные значения силы взаимодействия между нитями основы и утка), что позволяет исключить подвижность нитей, при этом ткань полотняного переплетения обладает анизотропией свойств в направлении основы и утка, которая возникает вследствие максимального изгиба основы и минимального изгиба утка.

Установлено, что ткани переплетения саржа 3/3 и неправильный шестиремизный атлас имеют одинаковый изгиб основы и утка, удовлетворяют условию равнодеформативности, и тем самым имеют преимущества при изготовлении защитных изделий.

Ключевые слова: защитные ткани, стойкость при прорезании, ткацкие переплетения, усилие вытягивания нити, коэффициент связности.

Информация о статье: поступила 12 сентября 2025 года.

Researching the relationship between the parameters of the fabric structure and its protective ability when cutting

Pavel E. Safonov

TEKS-CENTRE LLC, Russian Federation

Abstract. The research is devoted to the study of the deformation features of protective fabric of various structures during low-speed indenter insertion in the form of a knife and to the establishment of the relationship between the parameters of the fabric structure and the features of its destruction. A fabric based on aramid complex threads of 29.4 tex with a surface density of about 160 g/m² was selected as the object of the study.

As part of the research carried out, the relationship between the pulling force of the threads, the stability when cutting through the fabric and the coefficient of connectivity of the fabric was determined. It is shown that with an increase in the connectivity coefficient, an exponential increase in the effort of pulling the warp and weft threads out of the fabric is observed.

It has been revealed that plain weave fabric has the highest protective ability when cutting with a knife. This is due to the monolithic structure of the fabric (maximum values of the interaction force between the warp and weft threads have been achieved), which eliminates the mobility of the threads. At the same time, plain weave fabric demonstrates anisotropic properties in the direction of the warp and weft, which occurs due to the maximum bending of the warp and the minimum bending of the weft.

It has been observed that 3/3 twill and irregular satin weave fabrics have the same warp and weft bending, satisfy the condition of equal deformability, and thus possess advantages in the manufacture of protective products.

Keywords: protective fabrics, resistance to cutting, weaving patterns, thread pulling force, cohesion coefficient.

Article info: received September 12, 2025.

Введение

При проектировании оптимальных структур защитных тканей на основе высокопрочных и высокомодульных нитей, предназначенных, в первую очередь, для изготовления мягкой бронезащиты или противопрокольной и противопорезной экипировки и спецодежды, необходимо иметь четкие представления о механизмах разрушения тканей с заданными параметрами строения при воздействии поражающих элементов определенной формы и с определенной скоростью/энергией.

Основной проблемой создания эффективных средств индивидуальной защиты от различных поражающих воздействий является проблема неполной реализации механических свойств высокопрочных и высокомодульных нитей в составе изделия.

Причинами неполной реализации свойств нитей в составе изделий или в отдельных слоях текстильных полотен, являются, во-первых, снижение механических свойств высокопрочных и высокомодульных нитей по переходам ткацкого производства, во-вторых, особенности строения ткани: переплетение нитей основы и утка, степень изгиба нитей в элементе ткани, длина основных и уточных перекрытий, степень закрепления и связность ткани.

Задача проектирования оптимальных структур тканей, защищающих от ударных, колющих и режущих воздействий осложняется многофакторностью механизма взаимодействия поражающих элементов (скорость воздействия, тип индентора) с тканью (Elgohary, 2024). Отсутствие научно обоснованного представления о механизме взаимодействия поражающего элемента и текстильных материалов различных структур, приводит к тому, что задача повышения эффективности защиты решается в каждом конкретном случае методом проб и ошибок.

При анализе литературных источников, посвященных вопросам оценки эффективности защитных текстильных материалов, было установлено, что существует два противоречащих друг другу подхода к выбору защитных тканей.

По мнению некоторых исследователей (Elgohary, 2024; Sadegh & Cavallaro, 2012; Karahan, M. & Karahan, N., 2014), структура ткани должна препятствовать раздвижке и вытягиванию нитей, это условие достигается при максимальном количестве пересечений нитей основы

и утка на единицу площади ткани, например, плотняное переплетение. Максимальное число точек пересечения основы и утка в совокупности с максимальным наполнением ткани волокнистым материалом, как принято считать, делает ткань «монолитной», что должно способствовать достижению максимальной скорости распространения ударных волн.

Исследователями (Григорян, Кобылкин, Маринин и Чистяков, 2008; Харченко и Ермоленко, 2013; Харченко, 2014; Харченко, 2005) считается, что нити в ткани должны иметь возможность вытягиваться и раздвигаться, что должно привести к большим затратам энергии на преодоление сил трения, это позволяет более эффективно и раньше тормозить поражающий элемент.

Перечислим основные составляющие механизма взаимодействия поражающего элемента с текстильными защитными структурами, известные из многочисленных экспериментальных исследований Е.Ф. Харченко (Харченко и Ермоленко, 2013; Харченко, 2014; Харченко, 2005). Во-первых, происходит частичное или полное разрушение волокон в результате поперечного сжатия, во-вторых, разрушение волокон растягивающими нагрузками, в-третьих, происходит вытягивание нитей из структуры ткани, в-четвертых, имеет место раздвижка систем нитей, сопровождающаяся трением проникающего поражающего элемента о края образующегося отверстия. Таким образом, сделан вывод о том, что максимальная доля энергии поражающего элемента (40–50 %) поглощается именно за счет фрикционной составляющей при вытягивании и раздвижке нитей, а не за счет их растяжения, приводящего к непосредственному разрыву. Поэтому можно сделать вывод о том, что при проектировании защитных тканей важно получить оптимальное сочетание между усилием вытягивания нитей, раздвижкой систем нитей и прочностью отдельных нитей.

Также стоит отметить, что современные тенденции проектирования и применения защитных тканей на основе арамидных нитей направлены на широкое внедрение так называемых 3D тканей (многослойные ткани с различным способом соединения слоев). По мнению целого ряда авторитетных исследователей (Kumar et al., 2016; Grechukhin, Seliverstov & Rudovskiy, 2017; Рудовский и Гречухин, 2025; Abtew et al., 2020; Abtew et al., 2018) использование 3D тканей позволяет повысить защитные

свойства бронепакетов. Однако остается не исследованным вопрос о реализации свойств нитей в данных структурах, их повреждаемости в процессе ткачества и способности вытягиваться и раздвигаться под действием ударных нагрузок.

Таким образом, цель данной работы заключалась в изучении особенностей деформирования защитных тканей различных структур при низкоскоростном внедрении индентора в виде ножа и установлении взаимосвязи между параметрами строения ткани и особенностями ее деформирования.

Аналитическая часть

В качестве объекта исследования выбрана арамидная ткань с поверхностной плотностью порядка 160 г/м^2 , изготовленная на рапирном станке из комплексных нитей Руслан 29,4 текс с использованием различных вариантов переплетений.

Опишем геометрию структурного элемента изготовленных вариантов ткани. Для этого рассмотрим ткань в свободном состоянии, т. е. при отсутствии внешних нагрузок. Нить, изогнутая при тканеформировании, стремится восстановить свою прямолинейную форму, что приводит к возникновению усилий, действующих в области контакта перекрещивающихся нитей. Результирующей распределенных сил выступает сила, являющаяся следствием взаимодействия двух соприкасающихся нитей.

Определим длину осевой линии упругой нити l на участке 01 (рисунок 1), а также угол φ между осью нити

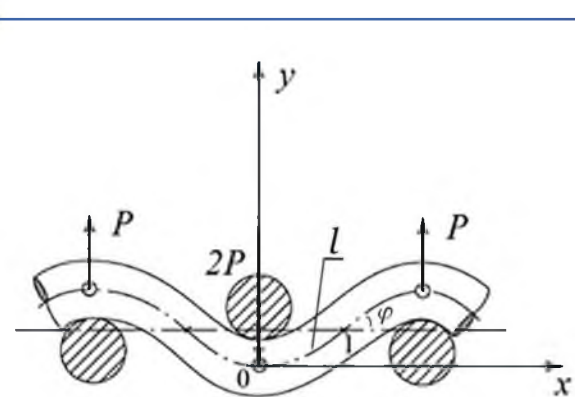


Рисунок 1 – Изгиб консольной упругой нити в структурном элементе ткани на участке 01

Figure 1 – Bending of the cantilever elastic thread in the structural element of the fabric on Site 01

и нейтральной линией в точке 1, эллиптические параметры k и α_0 (модуль эллиптического интеграла и его амплитуда, соответственно), уработки нитей основы и утка, и величины силы давления основы на уток и утка на основу P .

Приведем систему уравнений для определения четырех неизвестных l, k, α_0, P согласно методике, изложенной в [(Попов, 1986; Щербаков и Скуланова, 2008; Щербаков, 2011):

$$F(k) - F(\alpha_0) = \omega, \quad k \sin \alpha_0 = \frac{\sqrt{2}}{2},$$

$$\frac{y_1}{l_{01}} = 1 - \frac{2}{\omega} [E(k) - F(\alpha_0)], \quad \frac{x_1}{l_{01}} = \frac{2}{\omega} k \sin \alpha_0. \quad (1)$$

Принятые обозначения:

$$F(\alpha_0) = \int_0^{\alpha_0} \frac{d\alpha}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \alpha}}, \quad E(\alpha_0) = \int_0^{\alpha_0} \sqrt{1-k^2 \sin^2 \alpha} d\alpha,$$

$$\omega = \sqrt{\frac{Pl_{01}^2}{H}}, \quad F(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\alpha}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \alpha}}. \quad (2)$$

Поясним некоторые принятые обозначения. Индексом 0 будем обозначать величину в недеформированном состоянии, индекс 1 относится к нити основы, индекс 2 к нити утка. Для определения длины участка 01 (координаты x_1 и x_2) необходимо воспользоваться следующими выражениями:

$$x_1 = \frac{l_y R_y}{4} \text{ и } x_2 = \frac{l_o R_o}{4}, \quad (3)$$

где $l_o = \frac{1}{P_o}$ и $l_y = \frac{1}{P_y}$ – геометрическая плотность по основе и утку, мм; P_o и P_y – фактическая плотность по основе и утку, нить/мм; R_o и R_y – раппорт по основе и утку.

Для определения координат y_1 и y_2 разделим высоты волн изгиба основы h_o и утка h_y , определенные из микросрезов ткани, пополам:

$$y_1 = \frac{h_o}{2} \text{ и } y_2 = \frac{h_y}{2}. \quad (4)$$

где h_o и h_y – высоты волн изгиба основы и утка в ткани, мм.

Теперь, зная координаты x и y для случая основных и уточных нитей, и зная, жесткость арамидной нити Руслан 29,4 текс при изгибе $H = 3,1 \text{ сН}\cdot\text{мм}^2$ (жесткость при изгибе определена в соответствии с методикой [Егоров, 2010]) легко построить решение системы (1) с учетом (2) в среде MathCAD.

Определив длину осевой линии нити основы и утка можно вычислить их уработку:

$$a_o = \frac{l_{o1}-x_1}{l_{o1}} \cdot 100 \text{ и } a_y = \frac{l_{o2}-x_2}{l_{o2}} \cdot 100. \quad (5)$$

Зная эллиптические модули, определим угол наклона касательной в концевой точке для недеформированного состояния:

$$\varphi_{01} = 2 \arcsin k_1 - \frac{\pi}{2} \text{ и } \varphi_{02} = 2 \arcsin k_2 - \frac{\pi}{2}. \quad (6)$$

В таблице 1 представлены результаты расчета геометрических параметров элементарной ячейки для арамидных тканей различных переплетений.

Из таблицы 1 следует, что для рассмотренной ткани полотняного переплетения наблюдаются колоссальные значения силы взаимодействия нитей. В высокоплотной ткани полотняного переплетения, где нити основы имеют изгиб гораздо больше, чем нити утка (порядок фазы строения, $\Pi\Phi\mathcal{C} = 8$) – рисунок 2, давление утка на основу составляет $P_1 = 102,5$ сН, а давление основы на уток $P_2 = 17$ сН, т. е. в 6 раз меньше. Это с одной стороны обеспечивает структуре ткани монолитность, но с другой стороны приводит ткань в состояние с ярко выраженной анизотропией свойств.

Для ткани переплетения саржа 3/3, напротив, наблюдается случай равенства нагрузок, действующих со

стороны основы на уток и со стороны утка на основу, равенство уработок нитей $\Pi\Phi\mathcal{C} = 5$ (рисунок 3), что свидетельствует об однородности свойств по основе и утку.

Для более полного понимания факта анизотропии свойств защитных тканей необходимо обратиться к теории двухосного растяжения и расчету прочности ткани с учетом параметров ее строения и свойств нитей основы и утка. Теория двухосного растяжения ткани и методика расчета прочности ткани приводятся в соответствие с положениями, разработанными проф. Kawabata S. (Kawabata, Niwa, and Kawai, 1973) и проф. В.П. Щербаковым (Щербаков, 2011; Щербаков и Скуланова, 2008).

Рассмотрим ткань под действием растягивающих нагрузок, направленных вдоль нитей основы (ось x_1) и утка (ось x_2), полагая нерастяжимость оси нити. Тогда, натяжение нити, возникающее при деформировании ткани, распрямляет изогнутую нить. Реальная структура ткани заменяется моделью, в которой оси нитей основы и утка представлены прямыми линиями с точкой перегиба в месте пересечения нитей (рисунок 4).

Рассмотрим двухосное растяжение вдоль осей x_1 и x_2 . Обозначим шаг или длину структурного элемента вдоль основы (ось x_1) через t_{o1} , а вдоль оси x_2 через t_{o2} . Длина структурного элемента связана с плотностью нитей в ткани и раппортом ткани:

$$t_{o1} = \frac{R_y}{P_y} \text{ и } t_{o2} = \frac{R_o}{P_o}. \quad (7)$$

Таблица 1 – Значения геометрических параметров элементарной ячейки арамидных тканей различных структур

Table 1 – Values of geometric parameters of the unit cell of aramid fabrics of various structures

Переплетение ткани	Эллиптические параметры				Длина осевой линии, мм		Сила взаимодействия, сН		Углы наклона нити к нейтральной линии, град.		Уработка нитей, %	
	k_1	k_2	a_{o1}	a_{o2}	l_{o1}	l_{o2}	P_1	P_2	φ_{o1}	φ_{o2}	a_o	a_y
Плотняное	0,90	0,75	0,90	1,24	0,22	0,20	102,5	17,0	39,5	6,6	12,5	0,4
Саржа 1/5	0,82	0,81	1,04	1,06	0,49	0,55	9,2	6,2	20,7	18,0	3,5	2,6
Саржа 3/3	0,77	0,77	1,16	1,16	0,54	0,61	3,8	3,0	10,9	10,7	1,0	0,9
Репс уточный 3/3	0,73	0,81	1,30	1,07	0,20	0,57	11,3	5,7	4,5	17,7	0,2	2,5
Рогожка 3/3	0,76	0,78	1,19	1,14	0,63	0,56	2,4	4,0	9,3	12,5	0,7	1,3
Атлас шестиремизный	0,79	0,76	1,10	1,20	0,59	0,60	4,4	2,4	14,7	8,5	1,8	0,6



а

вдоль основы (along warp thread)



б (b)

вдоль утка (along weft thread)

Рисунок 2 – Микросрезы ткани полотняного переплетения
Figure 2 – Cross section of plain weave fabric



а

вдоль основы (along warp thread)



б (b)

вдоль утка (along weft thread)

Рисунок 3 – Микросрезы ткани переплетения саржа 3/3
Figure 3 – Cross section of 3/3 twill fabric

На границах ткани действует растягивающая сила f_i ($i = 1, 2$). Если на длину ткани приходится n_i нитей, то на конце одной нити по оси x_i действует сила $F_i = f_i / n_i$ (рисунок 5). При растяжении ткани по обеим осям в нитях возникает натяжение T_{fi} связанное с силой, действующей на ткань:

$$F_i = T_{fi} \cos \varphi_i, \quad [8]$$

где φ_i – угол между осью нити и нейтральной линией структуры в деформированном состоянии.

При моделировании растяжения ткани полагается, что расстояния между нитью основы и утка на линии их контакта сохраняются постоянными при условии неизменных поперечных размеров нитей:

$$h_1 + h_2 = h_{01} + h_{02}. \quad [9]$$

В деформированном состоянии также должно выполняться следующее уравнение равновесия для сжимающих сил основы и утка:

$$F_{c1} = F_{c2}. \quad [10]$$

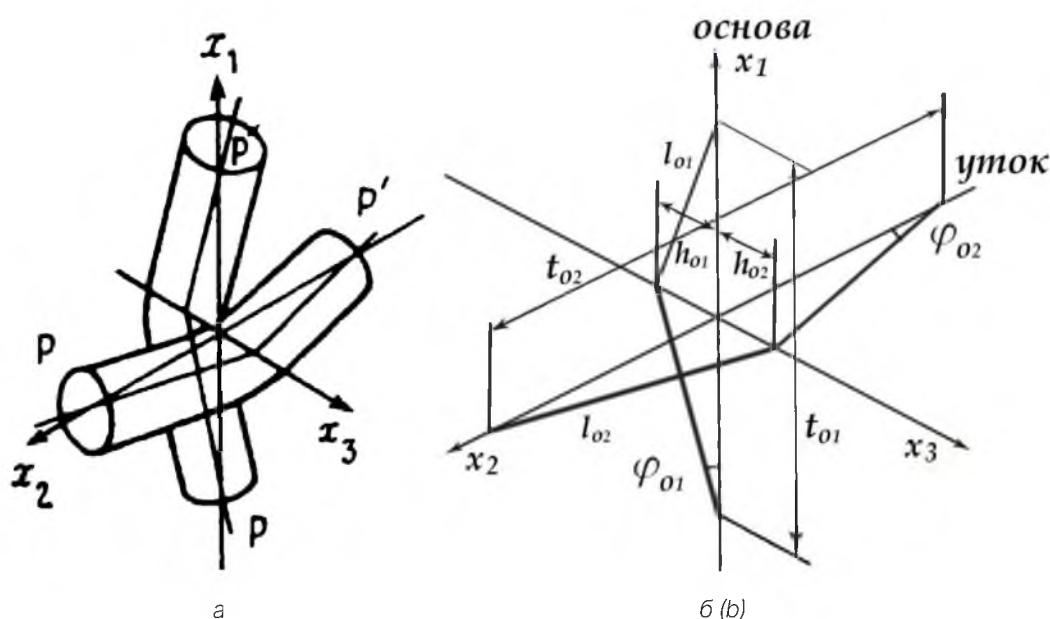


Рисунок 4 – Модель структурного элемента ткани (а) и расчетная схема (б)
Figure 4 – The model of the structural element (a) of the fabric and the design scheme (b)

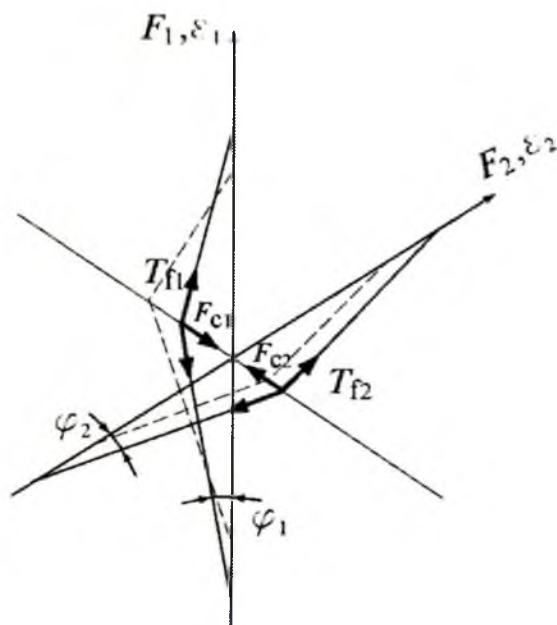


Рисунок 4 – Модель силового взаимодействия
основы и утка в элементе ткани
Figure 5 – Model of force interaction of warp
and weft in a fabric element

Натяжение арамидной нити определяется ее деформацией в соответствии со степенной зависимостью вида $\sigma(\epsilon) = E \cdot \epsilon^b$, параметры E и b легко определить на основании кривых деформирования нити, тогда натяжение нити в Ньютонах равно:

$$T_{fi} = E_{fi} \cdot \epsilon_{fi}^{b_i} \cdot \frac{T_i}{\gamma_i}, \quad (11)$$

где T_i – линейная плотность нити основы или утка, текс; γ_i – плотность нити, г/см³; E_{fi} и b_i – параметры степенной функции, описывающей кривую растяжения нити, E_{fi} в ГПа, b_i – безразмерный параметр; ϵ_{fi} – предельная деформация нити для случая расчетов прочности ткани.

Деформация ткани ϵ_t связана с деформацией нити ϵ_{fi} зависимостью:

$$\epsilon_{fi} = \frac{l_i}{l_{0i}} - 1 = \frac{\sqrt{\left(\frac{2h_i}{t_{0i}}\right)^2 + (1 + \epsilon_i)^2}}{l_{0i}} - 1. \quad (12)$$

Здесь длина осевой линии нити в недеформированном состоянии l_{0i} уже определена ранее при решении системы уравнений (1). Длина нити l_{0i} подвергается

растяжению/распрямлению при нагружении ткани. Далее при начальной длине нити l_{oi} и шаге структурного элемента t_{oi} определяется расстояние между нейтральной линией структуры PP' и осью нити вдоль x_3 в точке перегиба:

$$h_{oi} = \frac{\sin(\varphi_{oi}) \cdot l_{oi}}{2} \quad (13)$$

Нить утка находится в равновесии под действием сил натяжения T_{f2} и реакции N нити основы, направленной по оси x_3 в точке контакта нитей основы и утка. На нить основы действует реакция нити утка N' , равная по модулю и направленная противоположно силе N . Обе реакции уравниваются силами давления нитей друг на друга, которые сжимают нити и вызывают смещение обеих систем нитей по оси x_3 (рисунок 5). В деформированном состоянии имеем $h_2 = h_{oi} + h_{o2} - h_1$. Сжимающая сила связана с натяжением нити соотношением $F_{ci} = 2T_{fi} \sin(\varphi_i)$, где:

$$\sin(\varphi_i) = \frac{h_i}{\sqrt{h_i^2 + \left[\frac{(1 + \varepsilon_i)t_{oi}}{2}\right]^2}} = \frac{2h_i/t_{oi}}{\sqrt{\left(\frac{2h_i}{t_{oi}}\right)^2 + (1 + \varepsilon_i)^2}} \quad (14)$$

Из уравнения равновесия (10) и соотношения (12) получим выражение для определения неизвестных:

$$\left(E_{f1} \cdot \varepsilon_{f1}^{b_1} \cdot \frac{T_1}{\gamma_1}\right) \left[\frac{4h_1/t_{o1}}{\sqrt{\left(\frac{2h_1}{t_{o1}}\right)^2 + (1 + \varepsilon_1)^2}}\right] = \left(E_{f2} \cdot \varepsilon_{f2}^{b_2} \cdot \frac{T_2}{\gamma_2}\right) \left[\frac{4(h_{o1} + h_{o2} - h_1)/t_{o2}}{\sqrt{\left(\frac{2(h_{o1} + h_{o2} - h_1)}{t_{o2}}\right)^2 + (1 + \varepsilon_2)^2}}\right] \quad (15)$$

Если цель расчета, например, определение прочности ткани в направлении основы, то необходимо задать предельную деформацию нити основы ε_{f1} , характеристики нитей $[E_{fi}, b_i, T_i, \gamma_i]$, структурные параметры в недеформированном состоянии $[h_{oi}, h_{o2}, t_{oi}, t_{o2}]$ и положить, что деформация ткани по утку отсутствует $\varepsilon_2 = 0$. После этого необходимо решить (15) относительно ε_1, h_1 и ε_{f2} .

Далее для расчета прочности ткани вычисляем по формуле (11) натяжение нити основы с учетом:

$$\varphi_i = \arctg \left[\frac{2h_i}{(1 + \varepsilon_i)t_{oi}} \right] \quad (16)$$

Сила, растягивающая ткань:

$$F_i = T_{fi} \cos(\varphi_i) \quad (17)$$

Теперь смоделируем кривые деформирования тканей (из расчета на одну нить). На рисунке 6 представлены расчетные кривые растяжения для основы и утка в ткани полотняного переплетения (неравнодеформативное поведение ткани), а на рисунке 7 представлены расчетные кривые растяжения для основы и утка в ткани саржевого переплетения (равнодеформативное поведение ткани).

При растяжении по основе в ткани полотняного переплетения, порядок фазы строения которой равен 8, на начальном участке кривой наблюдается распрямление сильно изогнутой основы, и только после распрямления изогнутой основы начинается ее непосредственное деформирование. Прямолинейная нить утка в ткани полотняного переплетения начинает деформироваться сразу. В ткани саржевого переплетения характер деформирования основы и утка совпадает, значит, эта структура удовлетворяет условию равнодеформативности [Бова и др., 1999].

Таким образом, предложенное описание растяжения и предельного состояния тканей различных переплетений методами структурной механики позволяет объяснить механизм явлений при деформировании и

нагружении ткани, что имеет принципиальное значение при проектировании защитных тканей с заданными свойствами.

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

Определим основные стадии разрушения тканей при низкоскоростном внедрении индентора в виде двухстороннего ножа и установим влияние степени фиксации (усилия вытягивания) нитей и их способности раздвигаться на устойчивость при прорезании.

Способность ткани сопротивляться внедрению индентора на медленной скорости является, так же, как и способность нитей вытягиваться из ткани, косвенным показателем, по которому можно судить о ее эффек-

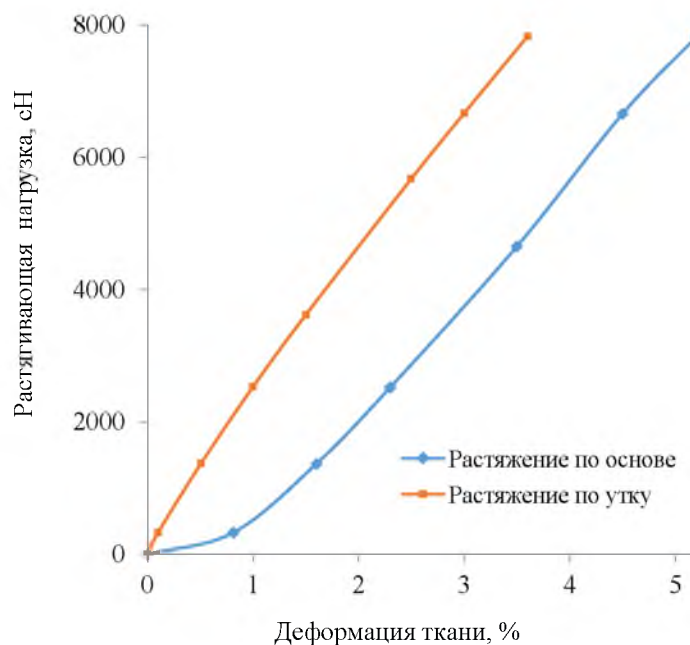


Рисунок 6 – Кривые деформирования ткани полотняного переплетения

Figure 6 – Deformation curves of plain weave fabric

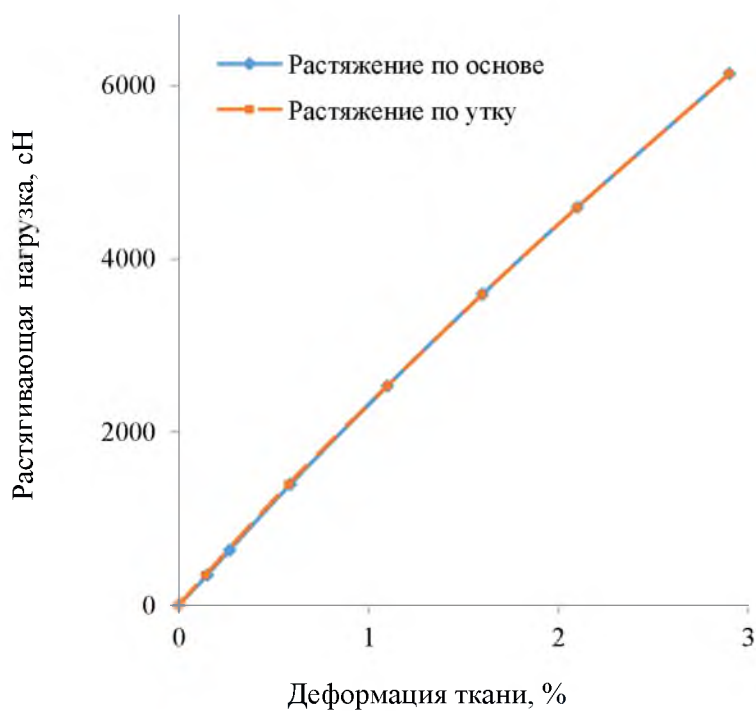


Рисунок 7 – Кривые деформирования ткани саржевого переплетения с равной степенью изгиба основы и утка

Figure 7 – Deformation curves of twill weave fabric with equal degree of warp and weft bending

тивности в реальных условиях эксплуатации. Однако, преимущество испытаний, проводимых при медленной скорости внедрения, заключается в том, что становится возможным подробно изучить все стадии разрушения, которое сопровождается одновременно разрывом нитей, их раздвижкой и вытягиванием из ткани.

Предложено характеризовать способность ткани сопротивляться внедрению индентора, во-первых, пиковой нагрузкой, при которой структура ткани перестает сопротивляться проникновению, во-вторых, работой деформирования ткани от момента контакта с ней индентора до момента его полного проникновения и беспрепятственного движения, приведенной к массе пробы.

В качестве индентора был выбран двухсторонний нож (тип S1 по стандарту NIJ 0115.00). Испытания по прорезанию предложено проводить на приборе Instron серии 4411 при скорости движения ножа 500 мм/мин. По результатам испытаний строятся диаграммы деформирования ткани.

Испытания проводились таким образом, чтобы лезвие ножа было ориентировано под углом 90 град. к ткани вдоль нитей основы или утка. Это позволяет выявить неоднородность свойств ткани вдоль систем нитей и проверить выполняется ли условие ее равнодеформативности.

В таблице 2 представлены результаты испытаний по прорезанию одного слоя ткани двухсторонним ножом. При внедрении ножа записывались диаграммы деформирования ткани, рассмотрев полученные диаграммы, были выделены основные стадии деформирования ткани и характерные точки с пиковой нагрузкой – рисунок 8: 1 – закрепление нити больше разрывной на-

грузки; 2 – закрепление нити меньше разрывной нагрузки, имеет место вытягивание и раздвижка.

Участок I-II. Преодоление сил трения между системами нитей, в зависимости от степени закрепления нитей в ткани наблюдается два случая: 1) если силы трения между нитями велики, то происходит разрыв нитей (точка № 1'); 2) в обратном случае нити начинают вытягиваться и раздвигаться. На диаграмме наблюдается пиковая точка № 1.

Участок II-III. Происходит движение лезвия через образовавшееся отверстие, при этом также наблюдается два случая поведения ткани: 1) если силы трения между нитями велики, то режущая кромка ножа постепенно разрушает нити, 2) в обратном случае нити, смещаются друг относительно друга, не разрушаются, но оказывают сопротивление перемещению ножа за счет трения о них его режущей кромки. На диаграмме появляется пиковая точка № 2, положение которой обусловлено конструкцией индентора (длиной режущей части лезвия).

Отметим, что положение точки № 1, как и точки начала участка II-III, связано со степенью изгиба нитей в ткани, чем больше уработка какой либо из систем нитей, тем дальше в левую сторону будут смещаться данные точки. На рисунке 8 в качестве допущения приняты одинаковые уработки нитей для рассматриваемых случаев поведения ткани.

Установлено, что наибольшая нагрузка при прорезании ткани ножом (точка № 1') наблюдается для полотняного переплетения, а наименьшая для рогожки 3/3, остальные переплетения показали промежуточные значения. Наибольшая нагрузка при движении лезвия через образовавшееся отверстие (точка № 2), которое

Таблица 2 – Показатели, характеризующие способность ткани сопротивляться внедрению ножа

Table 2 – Indicators characterizing the ability of the fabric to resist the introduction of a knife

Переплетение ткани	Пиковая нагрузка на участке I-II, Н		Пиковая нагрузка на участке II-III, Н		Деформация при разрушении, мм		Работа внедрения, Дж/г	
	Осн.	Ут.	Осн.	Ут.	Осн.	Ут.	Осн.	Ут.
Полотняное	238,75	232,40	78,70	99,85	10,05	18,92	13,17	17,57
Рогожка 3/3	33,55	49,25	77,25	94,90	5,36	7,33	8,86	10,79
Репс уточный 3/3	101,45	62,50	91,95	143,55	6,49	4,85	12,42	16,84
Саржа 1/5	62,00	67,85	150,75	117,45	9,68	9,89	15,53	13,48
Саржа 3/3	83,75	63,15	140,70	93,70	7,03	6,83	15,76	12,22
Атлас шестиремизный	78,00	67,40	155,65	124,45	6,84	6,32	16,94	12,47

сопровождается вытягиванием и раздвижкой нитей, наблюдается для ткани переплетения атлас, а наименьшая для рогожки 3/3 и полотняного переплетения.

Наибольшая работа внедрения вдоль основы наблюдается для ткани переплетения атлас, а вдоль утка для полотняного переплетения. Самые низкие значения

работы внедрения характерны для ткани переплетения рогожка 3/3. Стоит отметить, что для большинства образцов свойственна анизотропия работы деформирования в зависимости от направления нитей.

Таким образом, можно отметить, что, несмотря на различный характер деформирования образцов тканей их работа может совпадать, так в среднем работа деформирования для всех тканей кроме рогожки 3/3 составляет от 14 до 15,4 Дж/г.

На рисунке 9 показаны особенности разрушения ткани полотняного и саржевого переплетений. Из данных таблицы 2 и рисунка 9 видно, что в зависимости от переплетения нитей ткань по разному сопротивляется внедрению индентора. Так, в случае полотняного переплетения наблюдаются наивысшие значения пиковой нагрузки в точке № 1', происходит массовый разрыв нитей, и после этого структура ткани перестает оказывать существенное сопротивление движению индентора, который разрезает нити своей кромкой. На участке II-III нагрузка остается практически постоянной. Для других видов переплетений характерна ситуация, когда лезвие достаточно легко проникает в ткань, раздвигая и вытягивая нити, но при его дальнейшем продвижении совершается работа по преодолению сил трения между не разрушенными нитями, наблюдается рост нагрузки до абсолютного максимума на участке II-III (точка № 2).

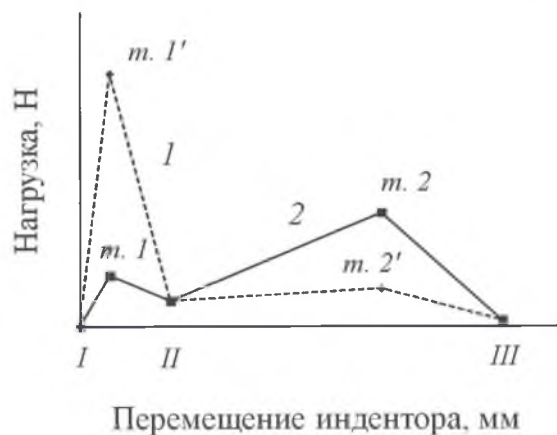
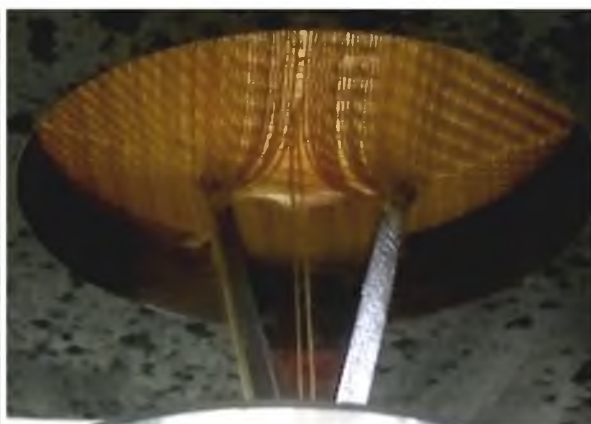


Рисунок 8 – Общий вид диаграмм деформирования ткани при внедрении индентора в виде ножа
Figure 8 – General view of tissue deformation diagrams during the introduction of an indenter in the form of a knife



полотняное переплетение
plain weave fabric



саржевое переплетение
twill fabric

Рисунок 9 – Внедрение ножа в арамидную ткань, выработанную различными переплетениями
Figure 9 – The introduction of the knife into the aramid fabric produced by various weaves

Очевидно, что степень закрепления нитей в ткани зависит от геометрических параметров ее строения, таких как высота волны изгиба нити, соотношение высот волн изгиба основы и утка, диаметров нитей в ткани с учетом смятия. В таблице 3 представлены значения высот волн изгиба основы и утка, размеры диаметров нитей по горизонтали с учетом смятия в ткани, а также значения усилий вытягивания и раздвигающей нагрузки систем нитей.

Геометрические параметры строения исследуемой арамидной ткани определялись на основе микросрезов вдоль основы и утка. Испытания по определению раздвигающей нагрузки проведены на приборе РТ-2 по ГОСТ 29104-91. Для определения усилия вытягивания использовалась соответствующая методика АО «ЦНИИСМ», в соответствии с которой с одного конца полоски ткани 25х250 мм делается бахрома длиной 50 мм, из бахромы выбирается 2 нити, так чтобы расстояние между ними и от краев образца было одинаковым. Свободный конец каждой нити заклеивают в клемму, состоящую из двух полосок плотной бумаги размером 40х7 мм. Испытания по вытягиванию двух нитей проводятся на разрывной машине Statigraph L фирмы Textechno, скорость нагружения 200 мм/мин.

Из данных таблицы 3 следует, что для образцов ткани полотняного переплетения и репса уточного 3/3 наблюдается ситуация, когда нити одной из систем имеют изгиб существенно больший, чем нити противоположной системы. В ткани полотняного переплетения основа имеет изгиб больше, чем уток, а в ткани репса уточный 3/3 наблюдается обратная ситуация. При этом для ткани полотняного переплетения характерно большее смятие нитей основы по горизонтали, а для репса уточного 3/3 – утка.

Построим зависимость усилия вытягивания нитей из различных арамидных тканей от коэффициента связности переплетения (рисунок 10). Коэффициент связности нитей в переплетении определяется по известной формуле:

$$C = \frac{P_o \cdot P_y \cdot T_{cp}}{10^3 \cdot F}, \quad (18)$$

где P_o и P_y – плотности ткани по основе и утку, нитей/см; $T_{(cp)}$ – средняя линейная плотность основы и утка, текс; F – коэффициент переплетения, характеризующий степень его «рыхлости».

Коэффициент переплетения определяется по формуле:

$$F = \frac{2 \cdot R_o \cdot R_y}{t_o + t_y}, \quad (19)$$

Таблица 3 – Значения показателей, характеризующих параметры строения и степень закрепления нитей в тканях различных структур

Table 3 – Values of indicators characterizing the parameters of the structure and the degree of fixation of threads in the tissues of various structures

Переплетение ткани	Диаметр нити в ткани, мм*		Высота изгиба нити, мм		ПФС	Усилие вытягивания нити, Н		Раздвигающая нагрузка, Н	
Вдоль системы:	Осн.	Ут.	Осн.	Ут.	-	Осн.	Ут.	Осн.	Ут.
Плотняное	0,516	0,270	0,190	0,030	7,91	Более 100	56,52	Более 100	Более 100
Рогожка 3/3	0,350	0,341	0,136	0,163	4,64	6,89	3,78	14,4	13,7
Репс уточный 3/3	0,274	0,440	0,021	0,233	1,66	5,59	25,06	Более 100	16,7
Саржа 1/5	0,395	0,395	0,231	0,229	5,02	16,67	4,58	43,1	24,2
Саржа 3/3	0,406	0,412	0,137	0,151	4,81	9,56	4,82	27,2	22,3
Атлас шестиремизный	0,392	0,385	0,200	0,119	6,02	10,16	5,09	35,0	77,2

Примечание: * – диаметр нити с учетом горизонтального смятия.

где R_o и R_y – раппорт ткани по основе и утку; t_o и t_y – число связей по направлению основы и утка в раппорте переплетения, считается по вершинам связей.

Стоит обратить внимание на то, что коэффициент связности имеет ограниченную область использования, так как он не учитывает крутку нитей, их сырьевой состав и коэффициент трения, предполагает использование простых (главных, производных от главных, мелкоузорчатых) переплетений, примерное равенство соотношений плотностей нитей по основе и утку, и их линейных плотностей. Однако в рамках проводимого исследования эти допущения могут быть приняты.

Установлено, что с увеличением коэффициента связности наблюдается экспоненциальный рост усилия вытягивания нитей основы и утка из ткани. Полученный вывод вполне согласуется с данными по расчетным значениям силового взаимодействия нитей в местах их контакта.

В заключении необходимо ответить на вопрос о том, как влияют параметры строения ткани на характер ее деформирования при внедрении ножа. Итак, установлено, что для большинства рассмотренных структур

защитных тканей наблюдается два случая деформирования при внедрении ножа.

Первый случай назовем «упругое разрушение», он наблюдается тогда, когда силы взаимодействия между нитями основы и утка слишком велики и происходит их массовый разрыв на начальном этапе внедрения индентора, а далее незначительная часть энергии затрачивается при трении индентора о края образовавшегося отверстия.

Второй случай назовем «вязкое разрушение», он наблюдается тогда, когда нити основы и утка имеют слабое закрепление в структуре ткани, на начальном этапе внедрения индентора нити начинают вытягиваться и раздвигаться, а не разрушаться, индентор легко образует входное отверстие, но по мере его продвижения затрачивается значительная часть энергии на вытягивание и раздвижку систем нитей.

Для того чтобы оценить какой случай деформирования ткани будет наблюдаться в каждом конкретном случае необходимо ввести понятие «степени упругости разрушения» – K_e .

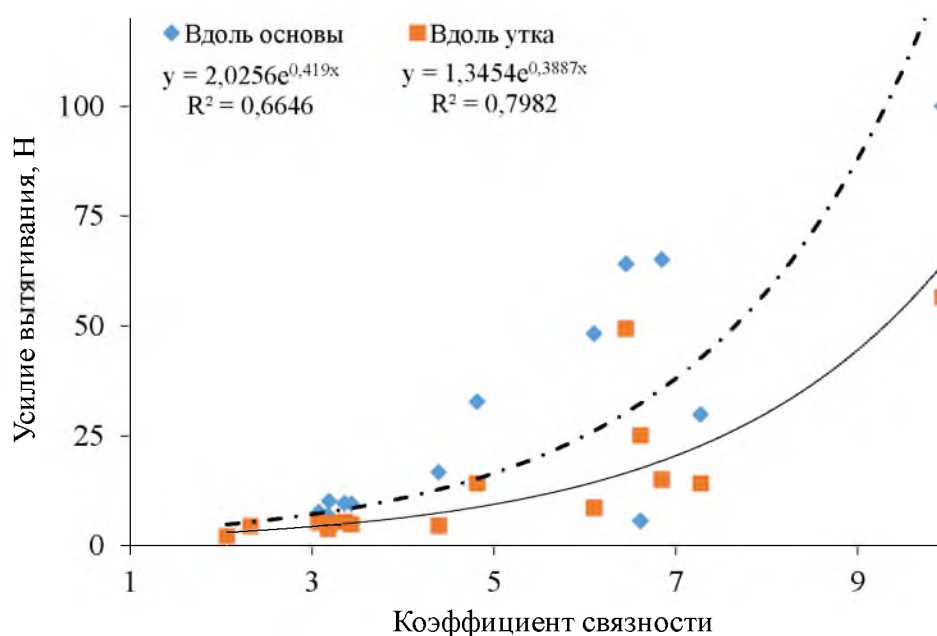


Рисунок 10 – Зависимость усилия вытягивания нитей от коэффициента связности переплетения
Figure 10 – The dependence of the pulling force of the threads on the coefficient of connectivity of the weave

Определим степень упругости разрушения ткани при прорезании как отношение пиковой нагрузки на участке I-II к пиковой нагрузке на участке II-III. Если $K_e < 1$, а нагрузка в точке 2 больше нагрузки в точке 1, то разрушение ткани считается вязким, энергия будет затрачиваться в основном на вытягивание и раздвижку нитей. Если $K_e > 1$, а нагрузка в точке 1 больше нагрузки в точке 2, то разрушение ткани считается упругим, энергия будет затрачиваться в основном на разрыв нитей на начальном этапе внедрения, вытягивание и раздвижка затруднены из-за высокой степени закрепления нитей.

Вывод, важный с точки зрения проектирования тканей с заданным характером разрушения, заключается в том, что с приближением коэффициента связности к значению 5 коэффициент степени упругости разрушения становится больше 1 ($K_e > 1$). Таким образом, для получения структуры ткани с максимальной прочностью при прорезании или проколе, необходимо получить коэффициент связности больший либо равный 5. Для структур, где необходимо реализовать «вязкое» разрушение (например, ткани для противоосколочной защиты) коэффициент связности переплетения должен быть меньше 5, а предпочтительно, находиться в пределах от 2 до 3,5.

Выводы

1) практическая значимость работы заключается в том, что зная коэффициент связности ткани и параметры силового взаимодействия в месте пересечения основы и утка, становится возможным прогнозировать степень закрепления нитей в ткани и характер ее разрушения при взаимодействии с поражающим элементом;

2) в рамках проведенной работы установлено, что ткань полотняного переплетения обладает наивысшей защитной способностью при прорезании ножом, это обусловлено монолитностью структуры ткани (достигнуты максимальные значения силы взаимодействия между нитями основы и утка), что позволяет исключить подвижность нитей;

3) установлено, что разработанная ткань полотняного переплетения обладает анизотропией свойств в направлении основы и утка, которая возникает вследствие максимального изгиба основы и минимального изгиба утка, что не позволяет реализовать свойства систем нитей в одинаковой степени;

4) установлено, что ткани переплетения саржа 3/3 и неправильный шестиремизный атлас имеют одинаковый изгиб основы и утка, удовлетворяют условию равнодеформативности, и тем самым имеют преимущества при изготовлении защитных изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Бова, В.Г., Колодяжный, С.Т., Токарев, А.В., Тихонов, И.В., Швайков, Д.К., Чивилев, В.В., Прошкин, В.В., Сергеев, Б.Ю. и Киселев, В.А. (1999). *Ткань для баллистической защиты*. Пат. № 2126856 РФ, МПК D03D15/00; заявка 97108062/12; заявл. 16.05.1997; опуб. 27.02.1999.

Григорян, В.А., Кобылкин, И.Ф., Маринин, В.М. и Чистяков, Е.Н. (2008). *Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования*. Москва: РадиоСофт, Российская Федерация.

Егоров, Н.В. и Щербakov, В.П. (2010). Новый метод расчета жесткости нити при изгибе. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, № 5 [326], С. 23–27.

Попов, Е.П. (1986). *Теория и расчет гибких упругих стержней*. Москва: Наука, Российская Федерация.

Рудовский, П.Н. и Гречухин, А.П. (2025). Использование ткацких технологий для повышения эффективности средств индивидуальной бронезащиты. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*, № 1 [415], С. 140–145.

Харченко, Е.Ф. (2005). Основные стадии процесса взаимодействия пуля и осколков с текстильными бронематериалами. *Тезисы докладов VIII Международной конференции «Новейшие тенденции в области конструирования и применения баллистических материалов и средств защиты»*, Хотьково, С. 5–9.

Харченко, Е.Ф. и Ермоленко, А.Ф. (2013). *Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы. Т. 1. Механизмы взаимодействия с баллистическими поражающими элементами*. Москва: ОАО ЦНИИСМ, Российская Федерация.

Харченко, Е.Ф. (2014). *Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы. Т. 2. Современные защитные структуры и средства индивидуальной бронезащиты*. Москва: ОАО ЦНИИСМ, Российская Федерация.

Щербаков, В.П. и Скуланова, Н.С. (2008). *Основы теории деформирования и прочности текстильных материалов*. Москва: МГТУ им. А. Н. Косыгина, Российская Федерация.

Щербаков, В.П. (2011). Теория прочности ткани. *Сборник научных трудов по ткачеству, посвященный 100-летию со дня рождения П. В. Власова*, С. 66-72.

Abtew, M.A., Loghin, C., Cristian, I., Boussu, F., Bruniaux, P., Chen, Y. and Wang, L. (2018). Two dimensional (2D) P-Aramid dry multi-layered woven fabrics deformational behaviour for technical applications. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 374, 012055. DOI:10.1088/1757-899X/374/1/012055.

Abtew, M.A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C. and Cristian, I. (2020). Enhancing the ballistic performances of 3D warp interlock fabric through internal structure as new material for seamless female soft body armor development. *Applied Sciences*, vol. 10, iss. 14, pp. 4873. DOI:10.3390/app10144873.

Elgohary, D.H. (2024). Technological aspects of body armour textiles for ballistic protection application. *The Journal of The Textile Institute*, DOI: 10.1080/00405000.2024.2343162.

Grechukhin, A.P., Seliverstov, V.Y. and Rudovskiy, P.N. (2017). The method of determination of yarn bending rigidity and friction factor during interaction of fibers. *The Journal of the Textile Institute*, vol. 108, no. 12, pp. 2067-2072.

Karahan, M., Karahan, N. (2014). Effect of weaving structure and hybridization on the low-velocity impact behavior of woven carbon-epoxy composites, *Fibres & textiles in Eastern Europe*, no. 3 (105), pp. 109-115.

Kawabata, S., Niwa, M. and Kawai, H. (1973). The finite deformation theory of plain weave fabrics, parts I-III, *The Journal of The Textile Institute*, vol. 64, no. 1, pp. 21-46; no. 2, pp. 47-85.

Kumar, B.A., Chavan, V.V., Ahmad, S., Alagirusamy, R. and Bhatnagar, N. (2016). Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors. *International Journal of Impact Engineering*, 89 (2016): pp. 1-13.

Sadegh, A.M. and Cavallaro, P.V. (2012). Mechanics of energy absorbability in plain-woven fabrics: an analytical approach. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, iss. 1, vol. 7, pp. 10-25.

REFERENCES

Bova, V.G., Kolodyazhny, S.T., Tokarev, A.V., Tikhonov, I.V., Shvaykov, D.K., Chivilev, V.V., Proshkin, V.V., Sergeev, B.Yu. and Kiselyov, V.A. (1999). *Tkan' dlya ballisticheskoy zashchity* [Fabric for ballistic protection]. Patent No. 2126856 of the Russian Federation, IPC D03D15/00; application 97108062/12; application 05/16/1997; publ. 27.02.1999.

Grigoryan, V.A., Kobylkin, I.F., Marinin, V.M. and Chistyakov, E.N. (2008). *Materialy i zashhitny'e struktury dlya lokal'nogo i individual'nogo bronirovaniya* [Materials and protective structures for local and individual reservations]. Moscow: RadioSoft, Russian Federation (In Russian).

Egorov, N.V. and Shcherbakov, V.P. (2010). A new method for calculating the bending stiffness of a thread [Novy'j metod rascheta zhestkosti niti pri izgibe], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, no. 5 (326), pp. 23-27 (In Russian).

Popov, E.P. (1986). *Teoriya i raschet gibkix uprugix sterzhnej* [Theory and calculation of flexible elastic rods]. Moscow: Nauka, Russian Federation (In Russian).

Rudovskiy, P.N. and Grechukhin, A.P. (2025). Using weaving technologies to increase the efficiency of personal armor protection [Ispolzovanie tkatskikh tekhnologii dlya povysheniya effektivnosti sredstv individualnoi bronzashchiti], *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, no. 1 (415), pp. 140-145 (In Russian).

Kharchenko E.F. (2005). The main stages of the process of interaction of bullets and fragments with textile armored materials [Osnovny'e stadii processa vzaimodeystviya pul' i oskolkov s tekstil'ny'mi bronematerialami]. *Tezisy dokladov VIII Mezhdunarodnoj konferencii «Novejshie tendencii v oblasti konstruirovaniya i primeneniya ballisticheskikh materialov i sredstv zashchity»*, *Hot'kovo = Abstracts of the report of the VIII International Conference "The latest trends in the field of design and application of ballistic materials and protective equipment"*, *Khotkovo*, pp. 5-9 (In Russian).

Russian].

Kharchenko, E.F. and Ermolenko, A.F. (2013). *Kompozitny'e, tekstil'ny'e i kombinirovanny'e bronematerialy'. T. 1. Mexanizmy' vzaimodejstviya s ballisticheskimi porazhayushhimi e'lementami* [Composite, textile, and combined armor materials. Vol. 1. Mechanisms of interaction with ballistic damaging elements]. Moscow: JSC TSNIISM, Russian Federation [In Russian].

Kharchenko, E.F. (2014). *Kompozitny'e, tekstil'ny'e i kombinirovanny'e bronematerialy'. T. 2. Sovremennyy'e zashhitny'e struktury' i sredstva individual'noj bronezashchity* [Composite, textile, and combined armor materials Vol. 2. Modern protective structures and personal protective equipment]. Moscow: JSC TSNIISM, Russian Federation [In Russian].

Shcherbakov, V.P. and Skulanova, N.S. (2008). *Osnovy' teorii deformirovaniya i prochnosti tekstil'ny'x materialov* [Fundamentals of the theory of deformation and strength of textile materials]. Moscow: Kosygin Moscow State Technical University, Russian Federation [In Russian].

Shcherbakov, V.P. (2011). Theory of fabric strength [Teoriya prochnosti tkani]. *Sbornik nauchnyh trudov po tkachestvu, posvyashchennyj 100-letiyu so dnya rozhdeniya P. V. Vlasova* = *Collection of scientific papers on weaving, dedicated to the 100th anniversary of the birth of P. V. Vlasov*. Moscow: Kosygin Moscow State Technical University, pp. 66–72 [In Russian].

Abtew, M.A., Loghin, C., Cristian, I., Boussu, F., Bruniaux, P., Chen, Y. and Wang, L. (2018). Two dimensional [2D] P-Aramid dry multi-layered woven fabrics deformational behaviour for technical applications. *IOP. Conference Series Materials Science and Engineering*, 374, 012055. DOI:10.1088/1757-899X/374/1/012055.

Abtew, M.A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C. and Cristian, I. (2020). Enhancing the ballistic performances of 3D warp interlock fabric through internal structure as new material for seamless female soft body armor development. *Applied Sciences*, vol. 10, iss. 14, pp. 4873. DOI:10.3390/app10144873.

Elgohary, D.H. (2024). Technological aspects of body armour textiles for ballistic protection application. *The Journal of The Textile Institute*, DOI: 10.1080/00405000.2024.2343162.

Grechukhin, A.P., Seliverstov, V.Y. and Rudovskiy, P.N. (2017). The method of determination of yarn bending rigidity and friction factor during interaction of fibers. *The Journal of the Textile Institute*, vol. 108, no. 12, pp. 2067–2072.

Karahan, M. and Karahan, N. (2014). Effect of weaving structure and hybridization on the low-velocity impact behavior of woven carbon-epoxy composites, *Fibres & textiles in Eastern Europe*, no. 3 [105], pp. 109–115.

Kawabata, S., Niwa, M. and Kawai, H. (1973). The finite deformation theory of plain weave fabrics, parts I–III, *The Journal of The Textile Institute*, vol. 64, no. 1, pp. 21–46; no. 2, pp. 47–85.

Kumar, B.A., Chavan, V.V., Ahmad, S., Alagirusamy, R. and Bhatnagar, N. (2016). Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors. *International Journal of Impact Engineering*, 89 (2016): pp. 1–13.

Sadegh, A.M. and Cavallaro, P.V. (2012). Mechanics of energy absorbability in plain-woven fabrics: an analytical approach. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, iss. 1, vol. 7, pp. 10–25.

Информация об авторах

Information about the authors

Сафонов Павел Евгеньевич

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, главный технолог ООО «ТЕКС-ЦЕНТР», Российская Федерация.

E-mail: pavlin722007@yandex.ru, info@teks-centre.ru

Pavel E. Safonov

Candidate of Sciences [in Engineering], Senior Researcher, Chief Technologist, TEKS-CENTRE Ltd., Russian Federation.

E-mail: pavlin722007@yandex.ru, info@teks-centre.ru